



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

ANTONIO DUARTE MARCOS JUNIOR

**ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO IPCC-AR5 PARA O
BRASIL: IMPACTOS NO CLIMA E ENERGIA**

**ACARAPE – CE
2017**

ANTONIO DUARTE MARCOS JUNIOR

**ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO IPCC-AR5 PARA O
BRASIL: IMPACTOS NO CLIMA E ENERGIA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: **Prof. Dr. Cleiton da Silva
Silveira**

**ACARAPE – CE
2017**

ANTONIO DUARTE MARCOS JUNIOR

**ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO IPCC-AR5 PARA O
BRASIL: IMPACTOS NO CLIMA E ENERGIA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 05 / 07 / 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. George Leite Mamede

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira

**Direção de Sistema Integrado de Bibliotecas da UNILAB (DSIBIUNI)
Catalogação na fonte**

M321a Marcos Junior, Antonio Duarte.

Análise dos cenários de mudanças climáticas do IPCC-AR5 para o Brasil: impactos no clima e energia. / Antonio Duarte Marcos Junior. Redenção, 2017.

60 f.; il. Color.

Monografia (Graduação) do curso de Engenharia de Energia, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira – UNILAB.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Mudanças climáticas. 2. IPCC. 3. Método Thornthwaite . I. Título.

CDD 551.6

*A meu pai (in memoriam) pelo
esforço empenhado para me
tornar um homem de caráter e
que se orgulharia com mais
esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fôlego da vida.

A minha mãe, Luci Pinheiro, pelo apoio, dedicação e esforço para me proporcionar o seu melhor.

A minha filha, Kemily Marcos, razão que me motiva e dá forças a nunca desistir.

A meu orientador, Cleiton Silveira, pelo apoio e motivação, sem o qual não seria possível este trabalho.

Aos amigos que fiz em minha turma de Engenharia de Energias.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Clima e Planejamento Energético (CLIPE).

Aos meus professores que tanto influenciaram em minha formação repassando seus conhecimentos e vivências.

A todos os meus familiares e amigos, que direta ou indiretamente me influenciaram para a conclusão deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), pela organização do curso de Engenharia de Energias e empenho para que o mesmo tenha conceito de excelência.

A Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, por proporcionar a estrutura necessária para o funcionamento de todas as atividades do curso de Engenharia de Energias.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é a partir das projeções do IPCC-AR5 identificar possíveis alterações dos padrões climáticos de temperatura, precipitação, evapotranspiração e classificação climática, para as diferentes regiões geográficas brasileiras. Para tanto, foram utilizadas as projeções de 14 modelos do CMIP5 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2010 a 2099, em comparação ao cenário histórico (1950 a 1999). A metodologia consiste na obtenção dos campos mensais de precipitação e temperatura a 2 m dos modelos climáticos. A remoção de viés estatístico foi realizado com base nos dados mensais do *Climate Research Unit* (CRU). A estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) segue o método de Hargreaves e Samani. O balanço hídrico pelo método de Thornthwaite é realizado considerando ETP, acumulados mensais de precipitação corrigidas e os parâmetros de solo do *Harmonized World Soil Database* (HWSD), sendo a classificação climática por região com base nas variáveis de saída do método. As projeções dos modelos mostram aumento da ETP e temperatura, além do acréscimo das áreas de clima árido em todo Brasil. A Região Norte e Centro-oeste apresentam um aumento dos climas mais áridos, enquanto a Região Sul do país aponta para um aumento de climas úmidos.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, IPCC, Classificação Climática, Thornthwaite.

ABSTRACT

The objective of this work using the IPCC-AR-5 projections identify the possible changes in the climate patterns of temperature, precipitation, evapotranspiration and climatic class in Brazilian geographic regions. For this purpose, the projections of 14 CMIP5 models were used for the scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, for the period 2010 to 2099, in comparison to the historical scenario (1950 to 1999). The methodology consists in obtaining the monthly surface precipitation and temperature fields from climatic models. The statistical error was removed by using the monthly data from the Climate Research Unit (CRU). For the estimate of potential evapotranspiration (ETP), the Hargreaves and Samani method was employed. The water balance was performed using the Thornthwaite method considering the variables ETP, the corrected monthly rainfall accumulations and the soil parameters of the Harmonized World Soil Database (HWSD). The regional climatic classification is based on the output variables of the method. The projections show an increase in ETP and temperature in addition to the increase of arid climate areas throughout Brazil. The North and Center-West regions show an increase in the more arid climates, while over Southern Brazil is observed an increased in humid climate areas.

Key-words: Climate change; IPCC; Climatic Classification, Thornthwaite.

Lista de Quadros

Quadro 1: Comparação entre os cenários do IPCC.....	16
Quadro 2 - Modelos CMIP5 utilizados e seus respectivos institutos de pesquisa e países.....	24
Quadro 3 - Classificação Climática de Thornthwaite segundo o índice de umidade.....	29

Lista de Figuras

Figura 1: Variação sazonal de precipitação em alguns dos subsistemas do SIN.....	2
Figura 2: Variação sazonal de Energia Natural Afluente (ENA) para alguns dos subsistemas do SIN.....	2
Figura 3: Evolução da matriz elétrica brasileira segundo o PDE 2024.....	3
Figura 4: Evolução do setor hidrelétrico brasileiro segundo o PDE 2024.....	3
Figura 5: Média histórica anual de temperatura.....	7
Figura 6: Média histórica anual de precipitação.....	8
Figura 7: Principais climas do Brasil.....	9
Figura 8: Estrutura técnico-administrativa do PBMC.....	17
Figura 9: Esquema metodológico para classificação climática.....	22
Figura 10: Diagrama representativo do balanço hídrico.....	27
Figura 11 - Anomalia de temperatura para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	31
Figura 12 - Anomalia percentual de precipitação para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	33
Figura 13 - Anomalia percentual de evapotranspiração potencial para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	35
Figura 14: Classificação climática, para o território brasileiro, segundo os dados do CRU.....	36
Figura 15 - Classificação climática para o período histórico (1950-1999) segundo os modelos do IPCC.....	37
Figura 16 - Variação dos tipos climáticos na região Centro-Oeste. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d) 2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45, e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.....	41

Figura 17 - Variação dos tipos climáticos na região Nordeste. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia de área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.....42

Figura 18 - Variação dos tipos climáticos na região Norte. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.....43

Figura 19 - Variação dos tipos climáticos na região Sudeste. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.....44

Figura 20 - Variação dos tipos climáticos na região Sul. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P95-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.....45

Figura 21: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2010-2049.....47

Figura 22: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2040 a 2069.....48

Figura 23: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2070 a 2099.....49

Figura 24: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período e 2010 a 2049.....51

Figura 25: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período de 2040-2069.....52

Figura 26: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período de 2070 a 2099.....53

Lista de Abreviaturas

- BEN** – Balanço Energético Nacional
CAD – Capacidade Admissível de Água no Solo
CRU – *Climate Research Unit*
ENA – Energia Natural Afluente
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
ETP – Evapotranspiração Potencial
FAO – Fundação de Amparo a Agricultura das Nações Unidas
GEE – Gases de Efeito Estufa
HWSD – *Harmonized World Soil Database*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC – *Intergovernmental Panel Climatic Change*
MEAN – Massa de Ar Equatorial do Atlântico Norte
MEAS – Massa de Ar Equatorial do Atlântico Sul
MEC – Massa de Ar Equatorial Continental
ONU – Organização das Nações Unidas
PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
RCP – *Representative Concentration Pathway*
SCC – Sistema de Classificação Climáticas
TSM – Temperatura da Superfície do Mar
UNEP – *United Nations Environment Programme*
UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*
WMO – *World Meteorological Organization*
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	Introdução.....	1
1	Introdução.....	1
1.1	Problematização.....	1
1.2	Justificativa.....	3
2	Objetivos.....	5
2.1	Geral.....	5
2.2	Específicos.....	5
3	Revisão de Literatura.....	6
3.1	Clima no Brasil.....	6
3.2	Sistemas de Classificação Climática.....	10
3.3	Mudanças Climáticas.....	11
3.4	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).....	14
3.5	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC).....	16
3.6	Água, Clima e Energia.....	17
3.7	Capacidade de adaptação.....	19
4	Metodologia.....	21
4.1	Dados Utilizados.....	23
4.2	Evapotranspiração Potencial.....	25
4.3	Remoção de Viés.....	26
4.4	Cálculo de Anomalia.....	26
4.5	Balanço Hídrico.....	27
4.6	Sistema de classificação climática de Thornthwaite.....	28
5	Resultados E Discussão.....	30
5.1	Temperatura.....	30
5.2	Precipitação.....	32
5.3	Evapotranspiração.....	34
5.4	Classificação Climática.....	36
5.5	Escoamento Superficial.....	46
6	Conclusões.....	54
	Bibliografia.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A variabilidade temporal da vazão de rios, depende da variabilidade climática. Tais variações podem causar déficit hídrico, quando a vazão dos rios é inferior a necessária para atender a determinado uso. Ou em outras situações pode ocorrer o excesso de vazão, causando enchentes e alagamentos. Esta variabilidade das vazões acaba por ditar como a oferta energética, por meio de hidrelétricas, se dará. Mudanças que acarretem a diminuição do potencial de geração das hidrelétricas pode implicar a necessidade de maior produção de energia por meio de termelétricas. As térmicas são mais caras e causam mais impactos ao ambiente e clima. Deve-se tomar medidas onde o uso de térmicas seja o menor possível. Variações no clima também são capazes por alterar a produção agrícola. Todas as culturas agrícolas são afetadas por condições climáticas, inclusive aquelas destinadas para fins energéticos como a cana-de-açúcar (para produção de etanol) e soja (biodiesel).

A Figura 1 mostra a sazonalidade de precipitação, segundo dados da *Climatic Research Unit* (CRU), para três dos quatro setores que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), sistema responsável por fazer a interligação da maior parte da malha elétrica do país. Na Figura 2 é mostrada a variação de Energia Natural Afluyente (ENA), que seria a energia que as hidrelétricas seriam capazes de produzir considerando a vazão natural dos rios. Através das duas figuras citadas é possível observar que a variação de ENA está diretamente ligada ao regime pluviométrico. Períodos com maior precipitação têm maior produção de ENA e em períodos mais secos existe uma menor quantidade de ENA disponível. A redução da disponibilidade hídrica, que está relacionada com o aumento de climas áridos, pode diminuir o potencial de geração das hidrelétricas implicando a necessidade de se buscar novas fontes para suprir a demanda.

O setor elétrico brasileiro é majoritariamente formado por fontes de energéticas renováveis (BEN, 2016, EPE, 2015) como mostrado na Figura 3. Pode-se observar na Figura 1b a perspectiva de expansão do setor elétrico brasileiro para 2024 segundo o Plano Decenal de Expansão da Energia 2024 (PDE 2024). Segundo o PDE 2024 é esperado que em 2024 mais de 85% da matriz elétrica brasileira seja composta por fontes renováveis de energia. Todas estas fontes renováveis dependem de condições climáticas para regular a sua oferta.

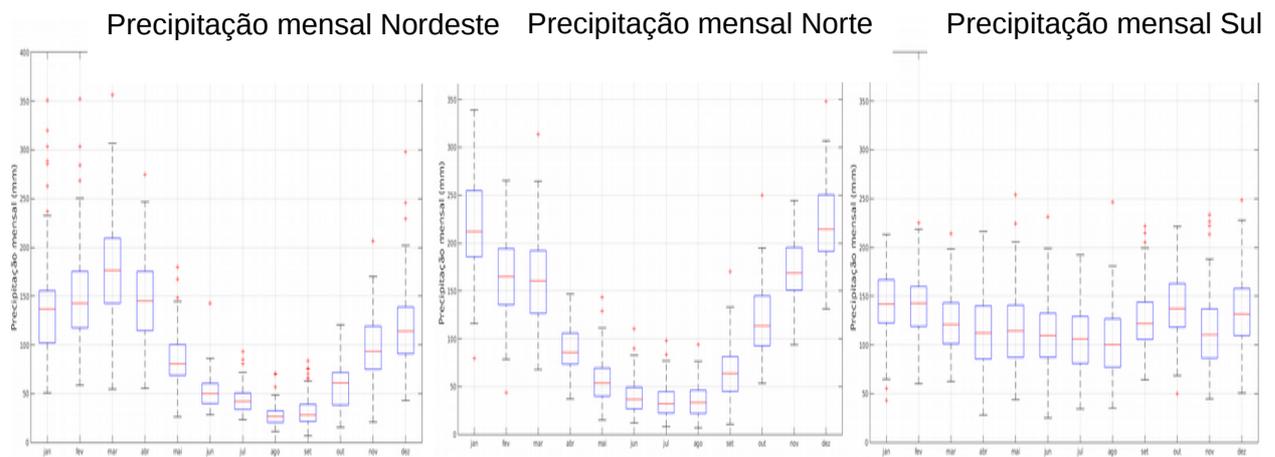
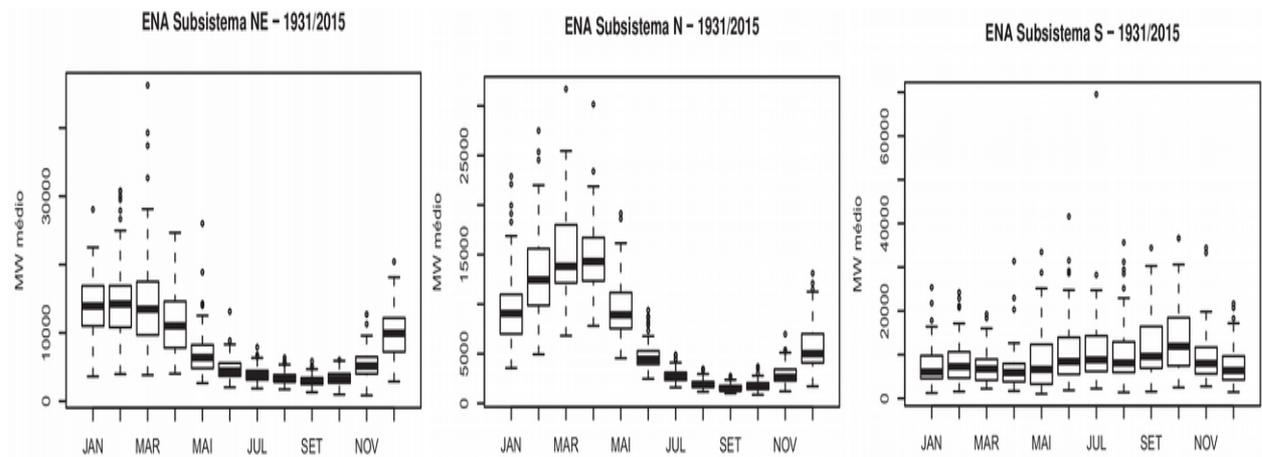


Figura 1: Variação sazonal de precipitação em alguns dos subsistemas do SIN



Fonte: NAVEIRO, MAÇAIRA e OLIVEIRA, 2016.

Figura 2: Variação sazonal de Energia Natural Afluenta (ENA) para alguns dos subsistemas do SIN.

Segundo o PDE 2024 a maior parte da expansão do setor hidrelétrico, até 2024, ocorrerá na Região Norte, conforme mostrado na Figura 4. Isto torna a Região crítica para o desenvolvimento e expansão do setor hidrelétrico. Alterações no clima desta região, que diminuam a oferta hídrica, poderão impactar negativamente nesses projetos podendo comprometer a viabilidade econômica dos mesmos. Assim, diante do exposto, o conhecimento de como as mudanças climáticas poderão ocorrer é fundamental para um melhor planejamento energético a longo prazo.

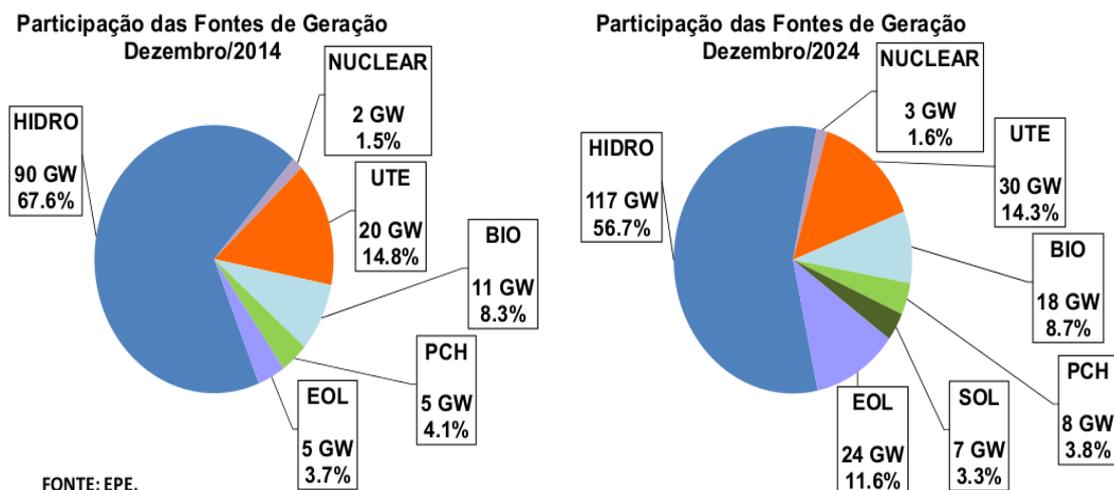


Figura 3: Evolução da matriz elétrica brasileira segundo o PDE 2024

Fonte: EPE, 2015

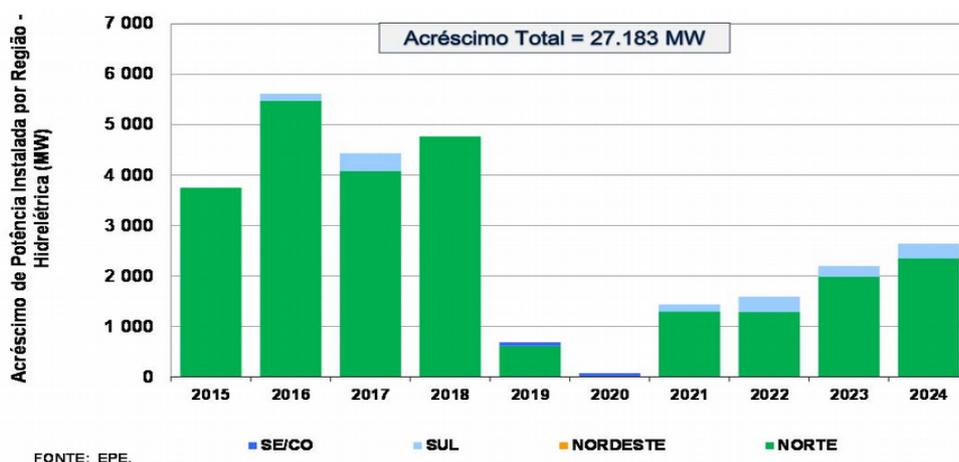


Figura 4: Evolução do setor hidrelétrico brasileiro segundo o PDE 2024.

Fonte: EPE, 2015

1.2 JUSTIFICATIVA

As mudanças climáticas podem produzir impactos significativos sobre os recursos hídricos e energéticos (PBMC, 2012; IPCC, 2014; IPCC, 2008; BANCO MUNDIAL, 2010). O aquecimento observado nas últimas décadas pode causar mudanças no ciclo hidrológico, por meio de modificações dos padrões de precipitação e evapotranspiração, além de impactar diretamente na umidade do solo, a reserva subterrânea e a geração do escoamento superficial (IPCC, 2007; IPCC, 2001). Estes efeitos poderão exercer grande pressão nos hidrossistemas brasileiros (FERNANDES *et al.*, 2017), uma vez que também estão associados à projeção de aumento da demanda por água para as próximas décadas impulsionadas principalmente pelo crescimento populacional e aumento das riquezas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que a mudança do clima impõe uma grande ameaça ao desenvolvimento sustentável, por afetar de forma direta e indireta grande parte da população, sua saúde, os recursos hídricos, a infraestrutura urbana e rural, as zonas costeiras, as florestas e a biodiversidade, bem como os setores econômicos – como agricultura, pesca, produção florestal, geração de energia, indústrias. O IPCC aponta impactos de grande magnitude sobre a América do Sul, em especial sobre recursos hídricos e setores econômicos relacionados, impondo ao governo brasileiro a necessidade de formular e implementar medidas de adaptação, com vistas a gerenciar riscos climáticos e responder de forma tempestiva aos prováveis impactos decorrente da mudança global do clima. Desta forma, torna-se fundamental a elaboração de subsídios ao planejamento nacional de longo prazo que incorpore a mudança do clima.

O Brasil é o país que tem a matriz energética com a maior participação de fontes renováveis do mundo (EPE, 2016). As fontes renováveis correspondem a 41,2% da oferta interna de energia do país (EPE, 2016). As principais fontes renováveis são a biomassa da cana-de-açúcar e a hidráulica, com 16,9% e 11,3%, respectivamente, do total da oferta de energia interna (EPE, 2016). Estas fontes dependem das condições climáticas, que podem alterar sua disponibilidade. No Brasil, quanto ao planejamento energético de longo prazo, não é recorrente se levar em consideração os impactos que as mudanças climáticas poderão causar no setor energético (SCHAEFFER et al., 2008).

Sistemas energéticos como o brasileiro, cujo planejamento e a geração eletroenergética apresentam correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas hidrelétricas e as suas afluições, estão sujeitos a impactos advindos da variabilidade e das mudanças no clima, tanto na produção de energia, em suas diversas formas, quanto no seu consumo. Existe, portanto, uma relação de interdependência entre água e energia (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011; SCANLON *et al.*, 2013), sendo o clima o elo que pode ser afetado e afetar essa relação. Scanlon *et al.* (2013) mencionam que o acréscimo na demanda por energia aumenta também a demanda por água e leva a uma redução quantitativa deste recurso. Além disso, isto implica numa maior quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que boa parte da matriz energética mundial tem as termelétricas como principal fonte geradora, funcionando como feedback positivo para as mudanças climáticas. Segundo Lucena et al. (2009) as termelétricas também são afetadas pela mudança

climática, pois o aumento da temperatura diminui a eficiência na conversão de energia das turbinas de gás natural.

Além disso, há uma tendência de aumento da demanda de água da irrigação no Brasil que pode levar à diminuição da segurança alimentar e maior vulnerabilidade para agricultores rurais, especialmente nas regiões semiáridas. Os impactos diretos do clima sobre a produção e a distribuição da produção agrícola no país são apenas alguns dos efeitos econômicos causados pela mudança no clima. Esses impactos se propagam nos diversos setores econômicos (DOMINGUES; MAGALHÃES; RUIZ; 2016), por exemplo, aumenta o custo de produção agrícola e da pecuária, eleva o custo dos insumos para o setor de alimentos e para o consumo das famílias.

A discussão de como o Brasil será afetado pelas mudanças no clima é fundamental para que medidas possam ser tomadas para tornar o país mais resiliente as condições climáticas do futuro ou mesmo à variabilidade do clima. Análises nesse sentido podem ser realizadas utilizando modelos globais do IPCC, para diferentes cenários e variáveis climáticas, como, por exemplo, precipitação, evapotranspiração, índice de aridez etc.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar as mudanças climáticas e na distribuição espacial dos tipos climáticos, segundo o sistema de classificação climática de Thornthwaite(1948), para as projeções do IPCC sobre o território brasileiro, avaliando os impactos que tais mudanças possam causar nas regiões de estudo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Identificar as regiões mais afetadas segundo as projeções de mudanças climáticas.

- Analisar os padrões de variação de variáveis climáticas (temperatura, precipitação e evapotranspiração).
- Identificar quais regiões poderão se tornar mais úmidas ou secas.
- Avaliar a extensão das mudanças climáticas em cada região

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CLIMA NO BRASIL

Alguns dos fatores que influenciam o clima são circulação atmosférica, ocasionada pelo aquecimento diferenciado do globo pela radiação solar, a distribuição dos oceanos e continentes e a própria topográfica dos continentes (GUIMARÃES, 2015). O Brasil é um país de grande extensão territorial tendo em seu território variações dos fatores determinantes do clima, este conjunto proporciona ao País uma variada diversidade climática em seus limites geográficos com predominância de climas tropicais (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

No norte do Brasil, próximo a linha do Equador, ocorre o anticiclone do Açores, no Hemisfério Norte, e o anticiclone do Atlântico, no Hemisfério Sul, tais eventos produzem as Massa de Ar Equatorial do Atlântico Norte (MEAN) e Massa de Ar Equatorial do Atlântico Sul (MEAS), respectivamente. Sobre a amazônia, existe um centro de ação produtor de Massas de Ar Equatorial Continental (MEC) que, com as duas massas anteriores, proporciona condições de umidade de calor à atmosfera regional. As duas primeiras atuam principalmente nas porções Norte e Nordeste do país, gera características de verão quente e úmido do centro-sul. O avanço destas massas de ar gera chuvas na porção norte e centro-sul do país, elas atuam pelas linhas de instabilidade e de ondas de calor norte e noroeste (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

A Figura 5 mostra a distribuição espacial da temperatura média no Brasil. As temperaturas, e conseqüentemente as zonas climáticas, estão distribuídas pelo país seguindo o mesmo padrão de distribuição da radiação solar (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007). As temperaturas médias anuais aumentam de Sul para Norte o que aliado a topografia brasileira, que não possui relevos tão notáveis, reforçam a correlação com a radiação solar. As maiores

temperaturas médias anuais ocorrem no Norte e Nordeste do país (podendo superar 26 °C), temperaturas intermediárias (24,1 °C a 26 °C) ocorrem na maior parte do país e no extremo sul do país são verificadas as menores temperaturas médias anuais abaixo de 18 °C (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

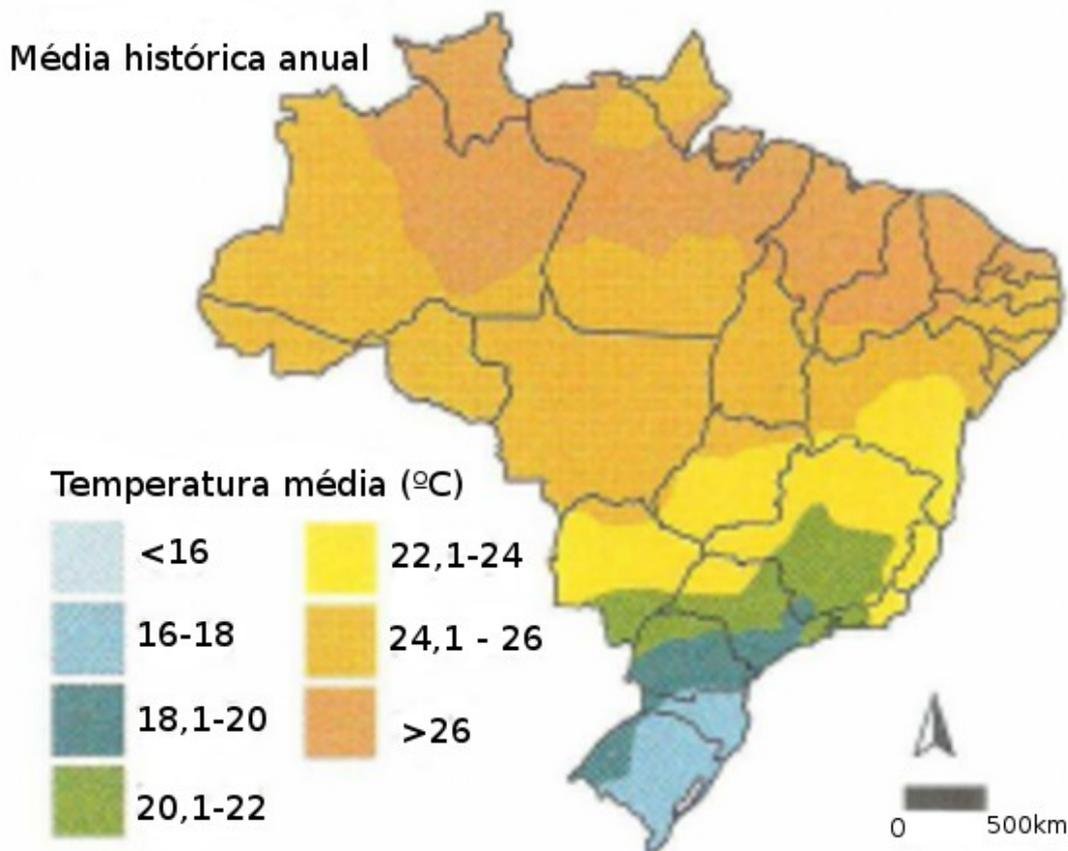


Figura 5: Média histórica anual de temperatura. Fonte: MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007.

A distribuição e variabilidade das chuvas (Figura 6) estão associadas à atuação e à sazonalidade dos sistemas convectivos de macro e meso escala. Explicando os diferentes regimes pluviométricos existentes refletindo na diversidade climática do país, com tipos chuvosos, semiáridos, tropicais e subtropicais (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007). Na Figura 6 a distribuição espacial das médias anuais destaca os dois grandes contrastes pluviométricos do país; a Região Norte, com as médias mensais mais elevadas (superiores a 2.800mm) e o sertão nordestino (média anual entre 125mm e 1200mm). O centro-sul dispõe disponibilidade

hídrica razoável (1.500mm a 2.000mm), o que reflete em sua elevada produção agropastoril e farta rede hidrográfica (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

A variação do escoamento nos rios é influenciada por diversos fatores, entre os quais se destacam a precipitação ocorrida na bacia de contribuição e as mudanças no uso e ocupação do solo. No Brasil, a precipitação média anual (histórico de 1961-2007) é de 1.761 mm, variando de valores na faixa de 500 mm na região semiárida do Nordeste a mais de 3.000 mm na região Amazônica (ANA, 2013). A vazão média anual dos rios no território brasileiro é de 179 mil m³/s, o que corresponde a aproximadamente 12% da disponibilidade hídrica superficial mundial (SHIKLOMANOV, 1998).

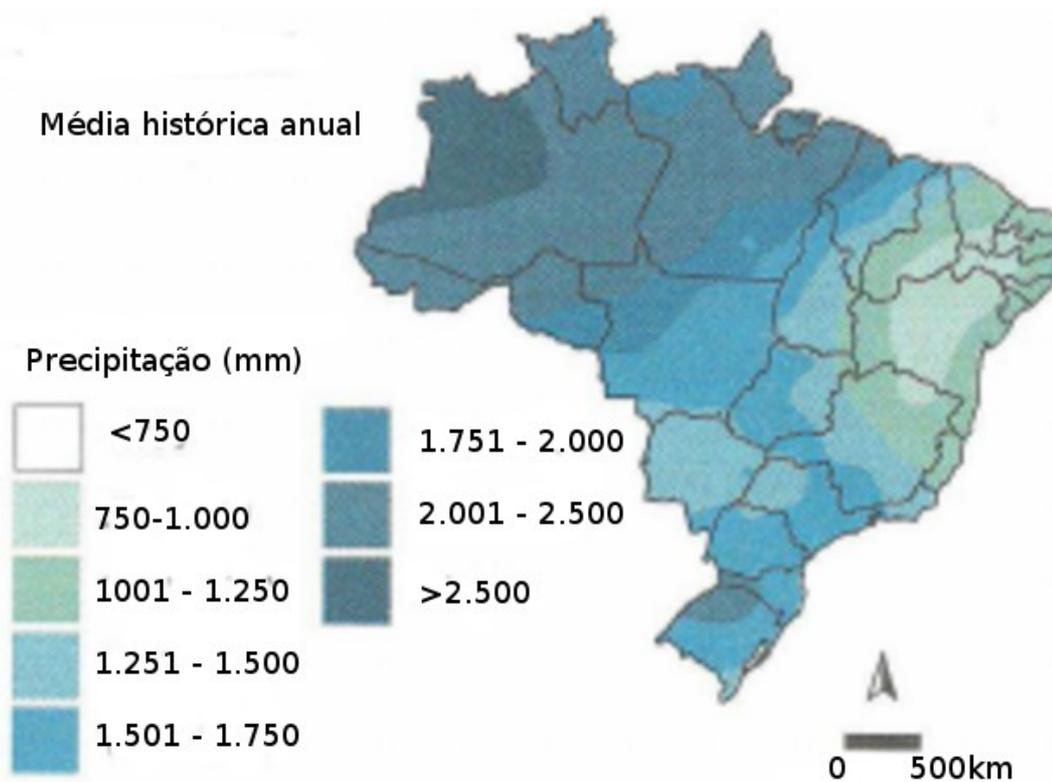


Figura 6: Média histórica anual de precipitação. Fonte: MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007.

A maior parte do território brasileiro (94%) está inserida nas zonas climáticas equatorial (55%) e tropical (39%), o que lhe confere predominância de climas quentes com fracas amplitudes térmicas. Os 6% restantes, correspondentes ao setor meridional brasileiro, está incluído na faixa climática subtropical onde as temperaturas são, em média, mais baixas e amplitudes térmicas mais acentuadas que na zona climática equatorial (MENDONÇA e

OLIVEIRA, 2007). Na Figura 7 são mostrados os principais climas do Brasil, segundo a classificação do IBGE.

O clima predominante na porção Norte do Brasil é o denominado Equatorial. Possui temperatura média anual entre 24 °C e 26 °C, portanto, é clima quente, cujos valores mais baixos encontrados nas regiões serranas e as mais elevadas, ao longo do vale do rio Amazonas, podem ultrapassar essas médias. Devido à umidade atmosférica e nebulosidade elevada possui homogeneidade térmica significativa (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

Climas zonais

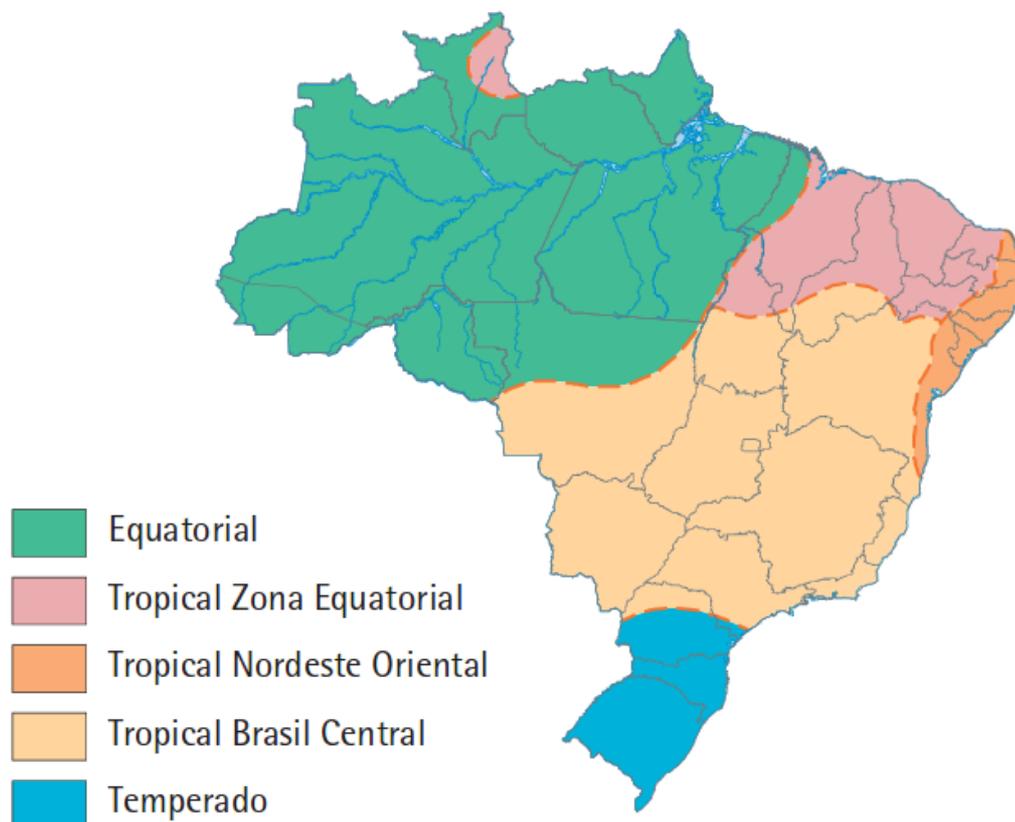


Figura 7: Principais climas do Brasil. Fonte: IBGE, 2002

Como visto na Figura 7 o clima de maior abrangência no território brasileiro é o denominado Brasil Central. Nesta região ao domínio da vegetação do cerrado compreende zonas de transição climática. Possui verões quentes e úmidos e invernos quentes e secos, embora sejam verificadas quedas pontuais na temperatura média da região durante esta

estação. Apresenta forte heterogeneidade térmica com temperaturas médias anuais entre 20 °C, porção sul, a 26 °C, porção Centro-Oeste (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

A Região Sul diferencia-se do restante do País por possuir um clima de condições mais amenas que os demais, o clima Temperado. A principal característica que o distingue dos climas do restante do país é a sua regularidade de distribuição pluviométrica associada a baixas temperaturas no inverno. Tais características se devem a sua posição geográfica, relevo e atuação de sistemas atmosféricos intertropicais e polares (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007).

A Região Nordeste do Brasil é uma região marcada pela predominância de climas mais áridos que as demais regiões do País. A ocorrência de secas na região é recorrente com registro que remontam ao Século XVII (MARENGO, 2006). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um importante vetor na definição da dinâmica atmosférica na porção norte e parte do Nordeste do Brasil (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007; MARENGO, 2001). Também influenciam no clima desta região a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Sul e Atlântico Norte (WAGNER e JASTENRATH. 1993 *apud*. MARENGO e VALVERDE, 2007).

3.2 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA

Os Sistemas de Classificação Climática (SCC) foram desenvolvidos como ferramentas que auxiliassem o zoneamento climático. Sendo uma importante ferramenta para a agricultura, por possibilitar a identificação das características climáticas de uma região (APARECIDO, 2016; GALLARDO et al., 2013; JACOBET, 2010; CUNHA e MARTINS, 2009). Os objetivos básicos da classificação climática são: ordenar grande quantidade de informação, facilitar rápida recuperação e facilitar a comunicação (CUNHA e MARTINS, 2009). Para a caracterização a Organização Meteorológica Mundial recomenda que seja realizado um estudo metódico de longo período, no mínimo 30 anos (CUNHA e MARTINS, 2009). SCCs geralmente são utilizados para validação de modelos climáticos (JYLHÃ et al., 2010).

Alguns dos principais SCC mais conhecidos são: Camargo (1991), Köppen e Geiger (1930) e Thornthwaite (1948), os dois últimos são os mais utilizados atualmente (APARECIDO *et al.*, 2016; CUNHA e MARTINS, 2009).

O SCC proposto por Thornthwaite (1948), usa dados de precipitação e evapotranspiração potencial junto com o balanço hídrico para analisar zonas climáticas. O SCC de Thornthwaite (1948) é o mais indicado para aplicações em agricultura (APARECIDO *et al.*, 2016). No SCC de Thornthwaite (1948) a cultura é vista como o meio físico pelo qual a água é transportada do solo para a atmosfera (ROLIM *et al.*, 2007). Neste SCC a classificação climática é dada seca ou úmida de acordo com a necessidade hídrica da planta (CAMARGO, 1991). É um sistema mais refinado que o de Köppen e Geiger (1928) (CUNHA e MARTINS, 2009) sua limitação está na determinação da evapotranspiração que geralmente é determinada apenas com base na temperatura, devido a falta de dados (ROLLIM *et al.*, 2007).

O SCC de Camargo (1991) foi desenvolvido para uma pesquisa de aptidão agroclimática realizada no Peru. Este SCC foi desenvolvido com uma forma de mapeamento dividido em duas partes principais, uma para o fator termal e a outra pra água. Maluf (2000) propôs uma modificação para este SCC que procurou melhorar a definição de clima adicionando uma nova classe, “subtemperado”, baseado nas mudanças nos níveis de temperatura mensais (APARECIDO *et al.*, 2016; CAMARGO, 2001).

O SCC de Köppen e Geiger (1928) é um dos mais utilizados e abrangentes do mundo, utiliza valores de temperatura e precipitação e considera que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região (CUNHA e MARTINS, 2009). A simbologia adota para classificação utiliza dois ou três caracteres; o primeiro indica a zona climática e é definido pela temperatura do ar e precipitação, o segundo considera a distribuição sazonal de precipitação e o terceiro a variação sazonal da temperatura do ar (CAMARGO, 2001; CUNHA e MARTINS, 2009). Modificações e críticas ao sistema relacionam-se aos limites térmicos/hídricos dos tipos climáticos determinados para regiões diferentes (ROLIM *et al.*, 2007). O Instituto de Geografia e Estatística (IBGE) utiliza a classificação de Köppen para a caracterização dos climas no Brasil (CUNHA e MARTINS, 2009).

3.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Mudança climática é uma alteração nos padrões do clima em um longo período de tempo, e pode ocorrer devido a uma combinação entre causas naturais e ações humanas (ALLISON, 2015). As reconstruções das séries temporais de temperatura dos últimos 1.000 anos indicam que as mudanças globais de temperatura e clima não ocorreram unicamente devido a causas naturais (MARENGO, 2006).

O clima global sempre tem variado através da história da Terra (ALLISON, 2015; MARENGO, 2006). Na última década do século XX, o mundo experimentou uma taxa de aquecimento sem precedentes, sendo a mais quente desde que as observações começaram a serem feitas (ALLISON, 2015; MARENGO, 2006). O aumento da temperatura média global foi acompanhado por aumentos contínuos nas temperaturas do oceano, armazenamento de calor oceânico e nível do mar (PBMC, 2013; MARENGO, 2006). Também houve encolhimento dos lençóis de gelo e a maioria das geleiras (ALLISON, 2015; MARENGO, 2006). A recente desaceleração da taxa de aquecimento superficial ocorre principalmente devido à variabilidade climática que é redistribuída pelos oceanos causando aquecimento de águas profundas e resfriamento de águas superficiais (PBMC, 2013; ALLISON, 2015). Há evidência que houve um aumento da salinidade do Oceano Atlântico Tropical, Equatorial e Sul já em elevadas latitudes, acima de 45°N, foi observada uma diminuição da salinidade (PBMC, 2013).

As mudanças climáticas causam impactos em ecossistemas, sistemas costeiros, segurança alimentar e da água, saúde, infraestrutura e segurança humana. Impactos em ecossistemas e sociedades já estão ocorrendo através do mundo. O aumento continuado das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) poderá fazer que o componente induzido pelo homem nas mudanças climáticas exceda a capacidade adaptativa de muitos lugares (ALLISON, 2015).

A ONU (2007) elaborou um estudo que destaca os principais impactos das mudanças climáticas sobre a América Latina. Sobre a maior parte da América Latina as projeções apontam para aumento de temperatura acima da média global, sendo que no sul da América do Sul as apontam aquecimento semelhante a média global. Aumento da precipitação no sudeste da América do Sul e incertezas das chuvas sobre o norte da América do Sul, incluindo a floresta Amazônica. Aumento dos períodos de seca no Nordeste do Brasil.

Somente após a publicação do Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em 2007, houve um maior investimento das iniciativas voltadas para tratar do assunto “mudanças climáticas” no Brasil (NOBRE, 2008). No âmbito da pesquisa científica destaca-se “Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas” (Rede Clima) criada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, que tem por objetivo gerar informações científicas que auxiliem o país a se adaptar as mudanças climáticas. Na parte de políticas públicas, existe a Plano Nacional de Mudanças Climáticas, constituindo de marcos legais para guiar as ações brasileiras para mitigar as mudanças climáticas aumentando capacidade adaptativa (NOBRE, 2008).

Das emissões brasileiras de GEE (em especial CO₂, CH₄ e N₂O), 55% são provenientes de alterações na vegetação (desmatamento e queimadas) e 25% da agricultura (principalmente metano). Estes valores diferenciam o Brasil de outros países, tanto desenvolvidos quanto em desenvolvimento, onde a maioria das emissões é proveniente da queima de combustíveis fósseis (NOBRE, 2008).

Na amazônia, alterações nos regimes pluviométricos e balanço hídrico são percebidos deste 1975-76, contudo existe a possibilidade de que tais alterações ocorram devido à tendência sistemática de queda ou aumento de longo prazo (MARENGO, 2001). Na Região Nordeste são observados diminuições na chuva desde 1950. Aumentos da temperatura do ar são notados em diversas regiões do Brasil (MARENGO, 2001).

Há indícios de que as características de eventos de El Niño no Pacífico têm mudado nas últimas décadas, conseqüente também há mudanças no modo de variabilidade da TSM do Atlântico Sul. Tais mudanças estão relacionadas com a diminuição da média de chuvas nas regiões Norte e Nordeste e aumento na Região Sul e Sudeste do país (PBMC, 2013).

Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) (2014) existe um grande impacto da variabilidade interanual, capaz de produzir modificações significativas nas chuvas sazonais de certas regiões, como a Amazônia, devido a variação de eventos de El Niño e La Niña. Alterações decadais/interdecadais são menos representativas, porém são relevantes em termos de adaptação por serem persistentes, capazes de gerar secas prolongadas ou eventos mais extremos de chuva (PBMC, 2014). As tendências de precipitação do Brasil podem ser explicadas, em parte, por mudanças de fase em oscilações interdecadais, contudo,

não se descarta a possibilidade que uma porcentagem seja devido ao aquecimento global observado (PBMC, 2014).

Silveira et al. (2013) analisaram o modelos climáticos do IPCC, para o Nordeste brasileiro, e verificaram que eles são capazes de representar bem as variações sazonais a maioria das variações interanuais, tendo algumas com correlação elevada no século XX, contudo têm dificuldades de representar as variações interdecadais.

3.4 PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é o órgão internacional para avaliar a ciência relacionada com mudanças climáticas. O IPCC foi criado em 1988 pelo World Meteorological Organization (WMO) e o United Nations Environment Programme (UNEP) para fornecer aos formadores de políticas, com regularidade, avaliações da base científica das mudanças climáticas, os impactos e riscos futuros, e opções de adaptação e mitigação. Os estudos do IPCC provêm uma base científica pra governantes em todos os níveis de desenvolvimento de políticas relacionadas as condições climáticas, e eles intermediam as negociações na conferência do clima das Nações Unidas – a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Os estudos são de relevância política mas não política prescritiva: eles podem apresentar projeções de mudanças climáticas futuras com base em diferentes cenários e os riscos que mudanças climáticas levanta e discute as implicações das opções de resposta, mas não dizem aos formuladores de políticas públicas quais as ações a serem tomadas (IPCC, 2013).

O IPCC representa uma oportunidade única de fornecer informações científicas rigorosas e equilibradas para os tomadores de decisão. A participação do IPCC é aberta a todos os países-membros da WMO e Nações Unidas. Ele atualmente contém 195 membros. O painel, composto por representantes dos estados-membros, encontra-se em sessões plenária para tomar grandes decisões (IPCC, 2013).

Os relatórios do IPCC são escritos por centenas de cientistas que oferecem seu tempo e perícia como Autores Principais Coordenadores e Autores Principais dos relatórios. Eles recrutam centenas de especialistas como autores para fornecer conhecimentos especializados

em áreas específicas. Os relatórios do IPCC passam por várias rodadas de redação e revisão para garantir que sejam abrangentes e objetivos produzido de forma aberta e transparente (IPCC, 2013).

Em seus relatórios o IPCC apontou que a capacidade da Terra reduzir sua capacidade de resfriamento diminui a medida que a concentração de gases do efeito estufa aumenta na atmosfera (MARENGO, 2001).

O IPCC, a partir do seu quarto relatório, trabalha com quatro cenários diferentes chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCPs), são um grupo de rotas de emissões e concentração de gás do efeito estufa que dão suporte a pesquisa dos impactos e potenciais respostas políticas para adaptação às mudanças climáticas considerando-se diferentes forçantes radioativas (VAN VILLET *et al.*, 2016; VAN VUURREN *et al.*, 2011). As forçantes radioativas são definidas como a diferença da irradiância líquida (ou fluxo radioativo) na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado devido ao agente climático (GUIMARÃES, 2015).

Os relatórios anteriores eram consideradas somente as forçantes por gases do efeito estufa e aerossóis como fatores artificiais para mudança climática (KIM *et al.*, 2013). Nas RCPs, utilizadas atualmente, são levados em conta fatores econômicos, tecnológicos, demográficos e políticas institucionais futuras (MOSS *et al.*; 2010) que são utilizados para a inicialização de modelos de simulação climática para o desenvolvimento de diferentes cenários para uso em uma ampla gama de clima (IPCC, 2007). O acréscimo de variáveis como atividade solar, propriedades da superfície terrestre, dispersão de aerossóis na atmosfera têm melhorado a representação dos modelos climáticos do IPCC (GUIMARÃES, 2015) No IPCC – AR5 são incluídos os fatores de ciclos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono, enxofre e ozônio (FLATO, 2013).

As RCPs diferem pela entrada para modelagem climática e são afetadas pela variação de GEE, uso da terra, poluição do ar, mudanças tecnológicas, produção de energia e uma variedade de outros fatores (VAN VUUREN *et al.*, 2011; CUBASCH *et al.*, 2013). Os cenários vão da RCP 8.5, que correspondem a ausência de políticas climáticas, o que reflete em uma alta gravidade dos impactos das mudanças climáticas, até a RCP 2.6, que representa um futuro com uma rígida política climática para limitar as emissões de GEE, refletindo em

pequenos impactos (VAN VUUREN *et al.*, 2011; CUBASCH *et al.*, 2013). Juntos os quatro cenários representam o alcance das forçantes radioativas. No Quadro 1 é apresentado um comparativo entre as quatro RCPs adotadas pelo IPCC.

3.5 PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC)

O PBMC foi instituído em setembro de 2009, criado pelos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Meio Ambiente (MMA). Surgiu da necessidade de se obter estudos que mostrem como o Brasil pode afetar e ser afetado pelas mudanças climáticas globais. Possui estrutura semelhante à do IPCC e têm por objetivo fornecer avaliações científicas sobre as mudanças climáticas de relevância para o Brasil, incluindo impactos, vulnerabilidade e ações de adaptação e mitigação. As informações científicas produzidas pelo PBMC ocorrem através de um processo objetivo, aberto e transparente de organização dos levantamentos produzidos pela comunidade científica sobre as vertentes ambientais, sociais e econômicas das mudanças climáticas. Assim o PBMC fornece subsídios para a formulação de políticas públicas e tomadas de decisões para enfrentar tais mudanças (PBMC, 2014).

Quadro 1: Comparação entre os cenários do IPCC

RCP	Descrição	Concentração de CO ₂ equivalente (ppm)	Rota
2.6	Um pico de forçante radioativa de aproximadamente 3 W/m ² antes de 2100, declinando para 2,6 W/m ² .	Pico de aproximadamente 490 ppm e depois declinando até 2100	Pico e declínio
4.5	Estabilização de 4,5 W/m ² até 2100 sem excesso.	650 (estabilizado depois de 2100)	Estabilização sem excesso
6.0	Estabilização em 6 W/m ² até 2100	850 (estabilizado)	Estabilização

	sem excesso.	depois de 2100)	sem excesso
8.5	Rota crescente resultando em 8,5 W/m ² até 2100. Forçante radioativa continua crescendo após 2100.	> 1.370 em 2100	Crescente

Fonte: Adaptado de CUBASCH *et al.*, 2013

As informações produzidas pelo PBMC são disponibilizadas por meio da elaboração e publicação periódica de Relatórios de Avaliação Nacional, Relatório Técnicos, Sumários para Tomadores de Decisão sobre Mudanças Climáticas e Relatórios Especiais sobre temas específicos. O Painel é composto pela seguinte estrutura: Conselho Diretor, Comitê Científico, Secretaria-Executiva, Grupos de Trabalho (Grupo de Trabalho 1, 2 e 3), Força Tarefa em Metodologias de Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Unidades de Apoio Técnico.



Figura 8: Estrutura técnico-administrativa do PBMC. Fonte: PBMC, 2007

O PBMC publicou em 2012 o Sumário Executivo das principais contribuições do RAN1 (Primeiro Relatório de Avaliação Nacional) do Grupo de Trabalho 1 (GT1 – Bases e Científicas das Mudanças Climáticas). Os relatórios voltam-se para trabalhos científicos publicados após 2007 (com destaques para América do Sul e Brasil) (GUIMARÃES, 2015).

3.6 ÁGUA, CLIMA E ENERGIA

As técnicas de manejos dos recursos hídricos devem ser escolhidas de modo a garantir o abastecimento e segurança hídrica (LIU *et al.*, 2015). A escassez hídrica depende de fatores como consumo, gestão dos recursos e regime pluviométrico (LIU *et al.*, 2015). É necessário que a gestão de recursos hídricos se adapte aos efeitos das mudanças climáticas, para que se consiga abastecer a demanda crescente, tais medidas, em muitos casos, implicam a melhoria do uso da energia (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011).

O nexos água energia trata estes dois termos como fatores correlacionados e indissociáveis. Este termo abrange os aspectos referentes a interação água e energia, tanto a “água para energia” quanto a “energia para a água” (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). O nexos água energia requer estratégias e ações coordenadas para o desenvolvimento das hidrelétricas entre regiões geográficas, assim como a troca de análises entre aumento da demanda energética e uso sustentável da água (LIU *et al.*, 2015). Do primeiro ao quarto relatório do IPCC o nexos água energia não é muito presente, em geral a água é citada rapidamente e apenas nos quesitos hidrelétricas e sustentabilidade (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). No último relatório do IPCC foi observado que certas medidas de adaptação, como dessalinização e bombeamento, talvez não sejam efetivas por envolverem alto consumo de energia (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011).

Hidrelétricas e termelétricas contribuem com 98% da eletricidade gerada no mundo anualmente (VAN VLIET *et al.*, 2016). Estas tecnologias de geração de energia dependem diretamente da disponibilidade de água. A temperatura da água para resfriamento representa um papel crítico no desempenho das termelétricas, sua eficiência diminui com o aumento da temperatura ambiente (VAN VLIET *et al.*, 2016; VAN VLIET *et al.*, 2012). Devido ao longo período de vida das termelétricas e magnitude dos investimentos, é importante o setor da eletricidade ter projeções realísticas e quanto a disponibilidade e temperatura da água, para que seja capaz de antecipar e adaptar as tecnologias de geração às mudanças da disponibilidade e qualidade da água (VAN VLIET *et al.*, 2012).

Geralmente os reservatórios, construídos para hidrelétricas, provêm mais do que somente energia sendo utilizados para usos múltiplos como por exemplo: controle de cheias, irrigação, navegação e abastecimento humano (LIU *et al.*, 2015). Em tais reservatórios o consumo de água e seus impactos são partilhados pelos seus diferentes beneficiários. As

hidrelétricas são empreendimentos que demandam grandes quantidades de água, o que gera preocupações quanto aos riscos de garantia de abastecimento (LIU *et al.*, 2015).

Os bicombustíveis são apontados como uma das medidas mais efetivas para mitigação dos efeitos do aquecimento global (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). Contudo a produção de biocombustíveis também demanda água, influenciando diretamente nonexo água energia, com a possibilidade de aumentar a demanda hídrica futura (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011).

O manejo agrícola influencia fortemente no uso da água e através disso no uso da energia para irrigação. O uso eficiente de água para irrigação varia conforme a técnica adotada (inundação, gotejamento, aspersão, entre outros) e devido ao alto grau de controle, sistemas pressurizados são geralmente mais eficientes no uso da água que a irrigação por inundação (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). Globalmente, a irrigação é utilizada em cerca de 20% das terras agrícolas e contribui com 40% da colheita mundial (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). Os impactos das mudanças climáticas na agricultura geralmente projetam que a demanda por água para produção de cultura crescerá com o aumento da temperatura e variação de precipitação. Contudo o aumento de áreas irrigadas pode ser necessário para a garantia do abastecimento alimentar do planeta, que requererá mais água e também energia para sua extração, transporte e uso (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011).

3.7 CAPACIDADE DE ADAPTAÇÃO

O termo adaptação refere-se ao ajustamento de sistemas naturais ou humanos, em resposta às mudanças climáticas e seus efeitos, o qual regula ou explora oportunidades benéficas (NOBRE, 2008). Alguns fatores sociais, que influenciam positivamente na capacidade de adaptação, tem aumentado nas últimas décadas incluindo expectativa de vida, alfabetização de adultos e acesso à água fresca. Entretanto, a capacidade adaptativa é limitada pela alta mortalidade infantil, baixa matrícula no ensino médio e altos níveis de desigualdade tanto em renda como acesso à água doce e cuidados a saúde, bem como desigualdade de gênero (ONU, 2007).

A adaptação tem uma longa e multidisciplinar história de investigação. A dimensão dos danos causados pelas mudanças climáticas e se serão benéficos ou não dependem de diversos fatores, não apenas as medidas adaptativas em si. A adaptação envolve mudanças em sistemas socioeconômicos em resposta aos impactos atuais e esperados da mudança climática no contexto das mudanças não climáticas interativas. Estratégias de adaptação e ações podem variar desde curto até longo prazo, transformações mais profundas, visam atender mais do que os objetivos de mudanças climáticas sozinhos e podem ou não ter sucesso em moderar danos ou explorar oportunidades benéficas (MOSER e EKSTROM, 2010).

Van Vliet *et al.* (2016) propuseram um conjunto de ações que podem ser adotadas como medidas de adaptação, do setor elétrico, às possíveis restrições hídricas causadas pelas mudanças climáticas. As ações propostas são:

1. Aumento da eficiência das hidrelétricas e termelétricas;
2. Substituição das fontes de combustível das termelétricas (carvão e óleo substituído por gás);
3. Substituição de todos os sistemas de refrigeração de única passagem por sistemas de refrigeração com recirculação;
4. Usar água marinha pra refrigeração em termelétricas próximas da costa (<100 km);
5. Substituir sistemas de arrefecimento que utilizem água doce como fluido de refrigeração por sistemas que façam uso de água marinha ou arrefecimento a ar para, ao menos, 10% das termelétricas existentes e que são mais vulneráveis à restrições hídricas que possam ser causadas pelas mudanças climáticas.

Em seu estudo Van Vliet *et al.* (2016) verificou que o aumento total da eficiência, pra hidrelétricas, acima de 10% é capaz de compensar completamente a média de impactos anuais para o aumento da restrição hídrica devido a mudanças climáticas (América do Norte, Europa, África e Ásia). Contudo, para o nível mensal, as reduções ainda se mantêm em um nível inferior aos 10% do aumento da eficiência (ao redor do mundo a média das reduções máximas são 1,0-6,2% para a RCP 2.6-8.5) (VAN VLIET *et al.*, 2016). Para a América do

Sul e Austrália, as mudanças médias dos modelos do GCM mostram ainda pequenas reduções na média anual da capacidade útil da energia hidrelétrica (VAN VLIET *et al.*, 2016).

A maior parte das emissões de GEE do Brasil são resultantes do desmatamento e da queima de florestas, principalmente para dar espaço a pecuária. Isto faz com que a redução do desmatamento seja a principal medida para a mitigação das emissões de GEE do Brasil. A produção proveniente de atividades agrícolas e pecuária representam menos de 1% do PIB do Brasil tornando a relação emissões por PIB bastante desfavorável (NOBRE, 2008).

A recente crise energética brasileira, mostrou a dependência da matriz energética do país e de seus recursos hídricos, de condições climáticas. Uma alternativa adotada para combater esta crise é a construção de termelétricas que, embora gerem benefícios imediatos, no longo prazo poderão intensificar ainda mais as mudanças climáticas (NOBRE, 2001). Como as crises energéticas que têm ocorrido são de caráter imediato sendo urgente a garantia do suprimento da demanda é colocada em primeiro plano em detrimento das questões ambientais (NOBRE, 2001).

A agricultura do Brasil depende muito do conhecimento sobre a variabilidade e previsibilidade das chuvas. Após a detecção das vulnerabilidades climáticas é necessário iniciar-se a busca de estratégias e tecnologias para adaptação, inclusive tirando proveito de potenciais mudanças climáticas que sejam benéficas (NOBRE, 2001), como aumento de precipitação e umidade. No âmbito da agricultura, medidas que possam ser utilizadas para estabelecimento de cenários futuros passam pelo zoneamento dos possíveis cenários agrícolas em função dos cenários de mudanças climáticas e torna-se imprescindível a acentuada modernização das práticas agrícolas, com disseminação no campo da educação básica e tecnológica, de modo a tornar factível a adaptação às mudanças climáticas da agricultura familiar em pequenas e médias propriedades, já que é nesta escala que as respostas às mudanças climáticas podem ser mais rápidas e eficientes (NOBRE, 2001).

4 METODOLOGIA

O estudo foi realizado para as cinco regiões geográficas do Brasil: Centro-Oeste, Norte, Nordeste, Sul e Sudeste. Para cada uma destas foram analisados como a evolução dos

tipos climáticos decorre ao longo do século XXI de acordo com as projeções feitas pelos diferentes modelos do IPCC-AR5. Os tipos climáticos seguem o Sistema de Classificação Climática (SCC) de Thornthwaite. Esta seção resume os procedimentos utilizados para a obtenção desta classificação climática. A metodologia, após definição da área de estudo e coleta de dados, divide-se, basicamente, em quatro etapas (conforme Figura 9):

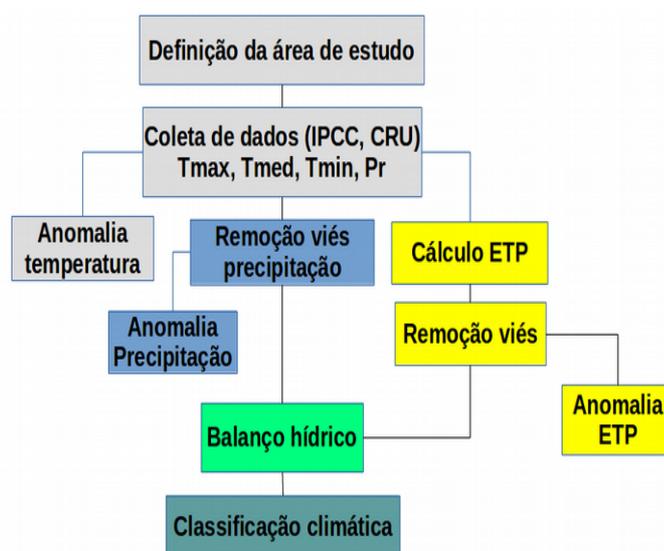


Figura 9: Esquema metodológico para classificação climática

- a primeira etapa consiste na obtenção dos campos de precipitação dos modelos globais do IPCC-AR5 para os cenários Histórico, RCP 4.5 e RCP 8.5 sobre o Brasil, e então realizada a correção estatística do viés. Essa correção utilizou como base de dados de precipitação mensal do *Climate Research Unit* (CRU). Para período de referência (Histórico) utilizou-se a série mensal de 1950 a 1999, enquanto para as projeções foi considerado o período de 2010 a 2099. Maiores detalhes sobre os modelos globais utilizados podem ser encontrados na seção 3.4;

- a segunda etapa consiste em obter as evapotranspirações potenciais médias mensais a partir dos modelos globais do IPCC-AR5 para os cenários Histórico, RCP 4.5 e RCP 8.5, usando o método de Hargreaves e Samani (1985). Para tanto são usados como dados de entrada as temperaturas máxima, mínima e média dos modelos globais do IPCC-AR5. Na sequência foi realizada a correção estatística do viés como feito para a precipitação, sendo a evapotranspiração potencial utilizada obtida pelas variáveis do CRU (UEA, 2015).

- na terceira etapa realiza-se o balanço hídrico pelo método de Thornthwaite, utilizando como dados de entrada as evapotranspirações estimadas e as precipitações com viés removido, e as componentes do solo obtidas através do *Harmonized World Soil Database* (HWSD) para o Brasil;
- a quarta etapa consiste em realizar a classificação climática de Thornthwaite para a base de dados do CRU e para os diferentes cenários e modelos globais do IPCC-AR5.

4.1 DADOS UTILIZADOS

Com a intenção de representar as condições climáticas históricas sobre o Brasil e remover o viés das variáveis meteorológicas modeladas, foram utilizados dados observacionais da “*University of East Anglia*”/“*Climate Research Unit*” (CRU) (UEA, 2015), disponíveis em <http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>.

Para o AR5 do IPCC foram estabelecidos cenários para estudar as possíveis mudanças decorrentes das ações antrópicas, que servem também para orientar os centros a fazerem simulações padronizadas, possibilitando a intercomparação dos resultados. Para tanto, se tem o cenário Histórico – que traz condições similares ao que foi observado para o clima presente, e os cenários futuros com rotas representativas de concentração de gases do efeito estufa (RCPs): RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, que correspondem a concentrações médias de 450, 650, 850 e 1370 ppm de CO₂eq, respectivamente (VAN VUUREN et al., 2011; TAYLOR, STOUFFER e MEEHL, 2012; FLATO et al., 2013). Foram utilizados nas análises resultados de 14 modelos de circulação geral da atmosfera (Quadro 2), para o Histórico no estudo do clima recente, e para os RCP4.5 e RCP8.5 com o objetivo de averiguar mudanças no clima. Mais detalhes sobre os modelos utilizados podem ser encontrados em Guimarães, 2015.

Quadro 2 - Modelos CMIP5 utilizados e seus respectivos institutos de pesquisa e países

Modelo	Grupo (ou centro) de modelagem	País
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of	Austrália
ACCESS1-3	Meteorology (BOM)	
BCC-CSM-1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CESM1-BGC	Community Earth System Model Contributors	Estados Unidos
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	França
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	França
IPSL-CM5B-LR		
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	Austrália
HadGem2-AO	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	Inglaterra / Coreia do Sul
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão

	(The University of Tokyo). National Institute for Environment Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies.	Japão
MIROC-ESM-CHEM		
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institute for Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	Alemanha

As séries temporais foram divididas em quatro períodos: o primeiro denominado como período histórico, (1950 à 1999), servindo de referência para a análise da evolução dos tipos climáticos nas regiões de estudo; os demais períodos se referem às projeções para o presente século divididos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099.

4.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

O SCC de Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948) faz a classificação climática a partir do balanço hídrico, o qual utiliza como variáveis de entrada: precipitação, evapotranspiração e Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD). Dentre os diversos modos existentes para se calcular a evapotranspiração potencial o escolhido foi o de Hargreaves e Samani (1982). A escolha se deu, principalmente, devido à quantidade de variáveis disponíveis para o cálculo. Neste método, a evapotranspiração potencial pode ser estimada a partir da Equação 1:

$$ETP = 0,0075 R_a C_f \delta^{\frac{1}{2}} T_{avg} \quad (1)$$

em que o etp é a taxa de evapotranspiração potencial (mm/d), R_a é o total de radiação solar extraterrestre recebida nas mesmas unidades de evaporação (mm), C_t é a redução do índice de temperatura que é uma função da umidade relativa, δ é a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas mensais, e $T_{avg,d}$ é a temperatura média no intervalo de tempo.

4.3 REMOÇÃO DE VIÉS

Como as variáveis do IPCC são projeções obtidas através de diferentes modelagens matemáticas, fez-se necessário a remoção de viés destas variáveis buscando ajustá-las aos valores observados. A remoção de viés foi feita para as séries de precipitação e evapotranspiração, utilizando os dados observados pelo CRU através da Equação 2.

$$X_{cor} = \frac{(x_m - \bar{x}_m)}{S_m} * S_{obs} + \bar{x}_{obs} \quad (2)$$

Em que X_{cor} é a variável corrigida, x_m é o valor da variável original do modelo, \bar{x}_m é a média do modelo, S_m é o desvio padrão do modelo, e S_{obs} são, respectivamente, a média e o desvio padrão observados.

Este método têm por desvantagem a possibilidade de obter valores negativos, para a variável corrigida, o que é impossível fisicamente. Para minimizar este problema caso o resultado da variável corrigida seja negativo troca-se este valor por zero.

4.4 CÁLCULO DE ANOMALIA

As anomalias foram calculadas para as projeções de 2010 a 2099 em relação ao período de 1950 a 1999. Para melhor a análise o período das projeções foi subdividido em períodos de 30 anos. As anomalias de temperatura e cobertura de classe climática são determinadas pela diferença entre o valor encontrado nas projeções e o obtido para o período histórico, Equação 3.

$$Anom = M_{XXI} - M_{xx} \quad (3)$$

Sendo $Anom$ a anomalia projetada, M_{XXI} o valor projetado pelo modelo para o Século XXI e M_{XX} o valor do modelo para o Século XX.

Para as variáveis precipitação e evapotranspiração a anomalia é dada pela diferença percentual entre os valores projetados para o Século XXI e os obtidos para o Século XX expressa pela Equação 4:

$$Anom = \frac{M_{XXI} - M_{XX}}{M_{XX}} \cdot 100 \quad (4)$$

4.5 BALANÇO HÍDRICO

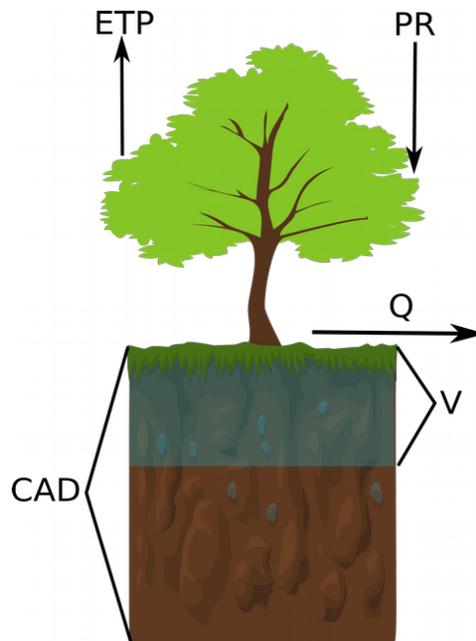


Figura 10: Diagrama representativo do balanço hídrico.

O balanço hídrico mensal, ilustrado na Figura 10, foi calculado utilizando-se a versão simplificada do método de Thornthwaite e Mather (1955) proposta por Rossato (2001) dada pela Equação 3 e ilustrado pela Figura 6. A resultado do balanço hídrico representa a quantidade de água que ficará disponível para o solo (V) para o mês posterior ao de estudo.

$$V_{t+1} = V_t + PR_t - ETR_t \quad (5)$$

Em que V é o armazenamento de água no solo (mm), PR a precipitação (mm), ETR a evapotranspiração real e t o tempo em meses, ou seja, o volume de água armazenado no solo, para um tempo futuro, depende das condições hídricas atuais.

A ETR é estimada fazendo as seguintes considerações: caso o volume de água existente no solo (V) somado a PR do mês seja inferior a ETP , para o mês em análise, a ETR será igual a soma de PR e V do contrário ETR será igual à própria ETP .

Outra variável utilizada no balanço hídrico é a capacidade de água admissível no solo (CAD), esta variável representa a quantidade máxima de água que o solo pode reter antes de ficar saturado e produzir escoamento. Neste trabalho foram utilizados os valores de CAD fornecidos pelo *Harmonized World Soil Database* ($HWSD$) disponibilizado pela Fundação de Amparo a Agricultura das Nações Unidas ($FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations$) (WIEDER, BOEHNERT, ONAN e LANGSETH, 2014).

Caso o resultado do balanço hídrico, para um período de tempo t seja superior ao valor de CAD do solo existirá escoamento superficial, denotado pela letra Q na Figura 6. Este escoamento superficial será, portanto, a diferença entre o resultado do balanço hídrico (V_{t+1}) e o valor de CAD . Assim o volume de água que estará disponível para o solo, no período subsequente ao de estudo, será sempre menor ou igual a CAD daquele solo.

4.6 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE THORNTHWAITTE

O SCC proposto por Thornthwaite classifica o clima de uma região em função do seu índice de umidade. Sendo este uma variável que depende do índice hídrico e o índice de aridez. O índice hídrico é dado pela equação 4 e representa a disponibilidade de água. O índice de aridez, dado pela equação 5, indica a deficiência hídrica da região.

$$I_h = \left(\frac{EXC}{ETP} \right) * 100 \quad (6)$$

$$I_a = \left(\frac{DEF}{ETP} \right) * 100 \quad (7)$$

Em que EXC é o excedente hídrico, ou seja, a quantidade de água que excede a capacidade de armazenamento solo e torna-se escoamento superficial.

DEF é a deficiência hídrica do solo, a quantidade de água que poderia ser evapotranspirada, mas não foi devido à quantidade de água disponível no solo ser menor do que a evapotranspiração potencial.

A partir dos dois índices citados é calculado o índice de umidade do solo que é obtido segundo a Equação 6:

$$I_u = I_h - 0,6 I_a \quad (8)$$

A partir do índice de umidade do solo, o clima da região em estudo é classificado conforme um dos nove tipos climáticos mostrados na Tabela 3.

Quadro 3 - Classificação Climática de Thornthwaite segundo o índice de umidade.

Tipos climáticos	Índice de umidade
A – Superúmido	$100 \leq I_u$
B4 – Úmido	$80 \leq I_u < 100$
B3 – Úmido	$60 \leq I_u < 80$
B2 – Úmido	$40 \leq I_u < 60$
B1 – Úmido	$20 \leq I_u < 40$
C2 – Sub-úmido	$0 \leq I_u < 20$
C1 – Sub-úmido seco	$-20 \leq I_u < 0$
D – Semiárido	$-40 \leq I_u < -20$
E – Árido	$-60 \leq I_u < -40$

Fonte: THORNTHWAITTE (1948)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TEMPERATURA

Os modelos mostram que em ambos os RCP's há aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras. Para o cenário RCP8.5, os efeitos na temperatura são maiores, principalmente no último período de 30 anos do século XXI, onde a anomalia de temperatura é superior a 3,5°C para a maioria dos modelos e para todas as regiões.

A mediana das anomalias de temperatura é de aproximadamente 1,2°C no período de 2010 a 2039 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nas regiões Nordeste e Sudeste e deslocou-se na direção positiva nos demais períodos. No Norte e no Centro-Oeste, o impacto nessa variável é mais intenso, com a mediana das anomalias aproximadamente igual a 1,5°C, enquanto no Sul a magnitude da anomalia é inferior às demais regiões do país, próximo a 1,0°C.

Para o cenário RCP 4.5, a mediana das anomalias de temperatura no período de 2040 a 2069 foi de aproximadamente 1,7°C na região Sul, 2,3°C nas regiões Norte e Centro-Oeste e 2°C para o Sul e Nordeste do país. Para o período de 2070-2099 há uma maior divergência entre as anomalias de temperatura projetadas pelos modelos, contudo a maioria dos modelos indica aumento de 2,5°C para todo território nacional.

Para o RCP 8.5, verifica-se para o período de 2010-2039 um comportamento semelhante ao mesmo período no cenário RCP 4.5. Para o período de 2040-2069 ocorre uma maior divergência entre os modelos de uma mesma região variando em até 1,5 °C (Região Sul), com medianas entre Regiões que variam de 2,2 °C (Região Sul) a 3,0 °C (Região Norte e Centro-Oeste). Para o período de 2070-2099 há um aumento da amplitude das anomalias projetadas pelos modelos, indicando incerteza nesse período e uma intensificação significativa dos valores médios desta variável. As regiões Norte e Centro-Oeste serão mais atingidas com as medianas das anomalias entre os modelos com valores próximos a 5 °C.

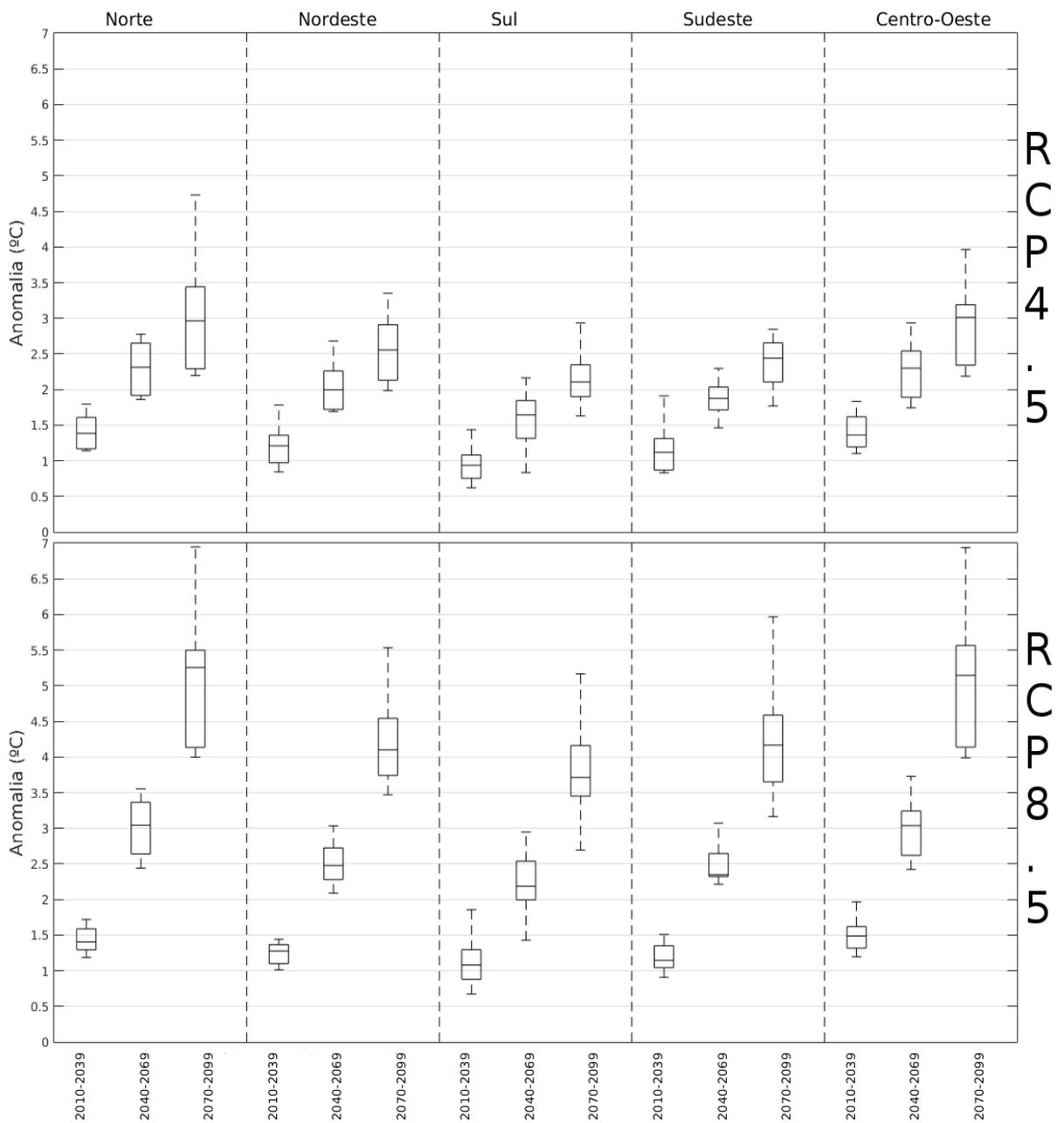


Figura 11 - Anomalia de temperatura para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039,2040-2069 e 2070-2099.

5.2 PRECIPITAÇÃO

Na Figura 12 são mostradas as anomalias de precipitação dos modelos do CMIP5 nas diferentes regiões do Brasil, em três períodos do século XXI: 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098. Os modelos divergem quanto ao futuro da precipitação para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Entretanto, as medianas das anomalias indicam que as regiões Norte e Nordeste, para ambos cenários, podem sofrer diminuição das precipitações ao longo do século, enquanto que indicam maior possibilidade de ocorrer anomalias positivas de precipitação no Sul e Sudeste do país. Na região Centro-oeste a mediana se apresenta em torno da média nos três períodos avaliados. A incerteza das projeções é verificada com a intensificação das emissões de gases do efeito estufa, visto que há um aumento da divergência entre os modelos no cenário RCP8.5 em comparação ao RCP4.5.

Os modelos mostram maiores divergências no último período do século, porém indicam uma intensificação do sinal da anomalia de precipitação mostrada nos períodos anteriores, mostrando reduções significativas principalmente na região Nordeste do país, alguns modelos mostram até-40% para o RCP8.5 e-30% para o RCP4.5 (Figura 12).

A mediana das anomalias de precipitação para o RCP4.5 apresenta valores de entre-5% e 5% no período de 2010 a 2039. Para o período de 2040-2069, projeta-se reduções nas precipitações nas Regiões Norte e Nordeste, com alguns modelos indicando diminuições nos valores médios anuais dessa variável em até 27% no Nordeste do país. Enquanto que para as demais regiões analisadas a maioria dos modelos indica aumento nas médias anuais de chuvas. Já para o RCP8.5 as medianas variam de -10% (Região Nordeste) a 8,5% (Região Sul). Para o período de 2070-2099 aumentam-se as incertezas entre os modelos, as quais variam entre -40% e 20% para a Região Nordeste.

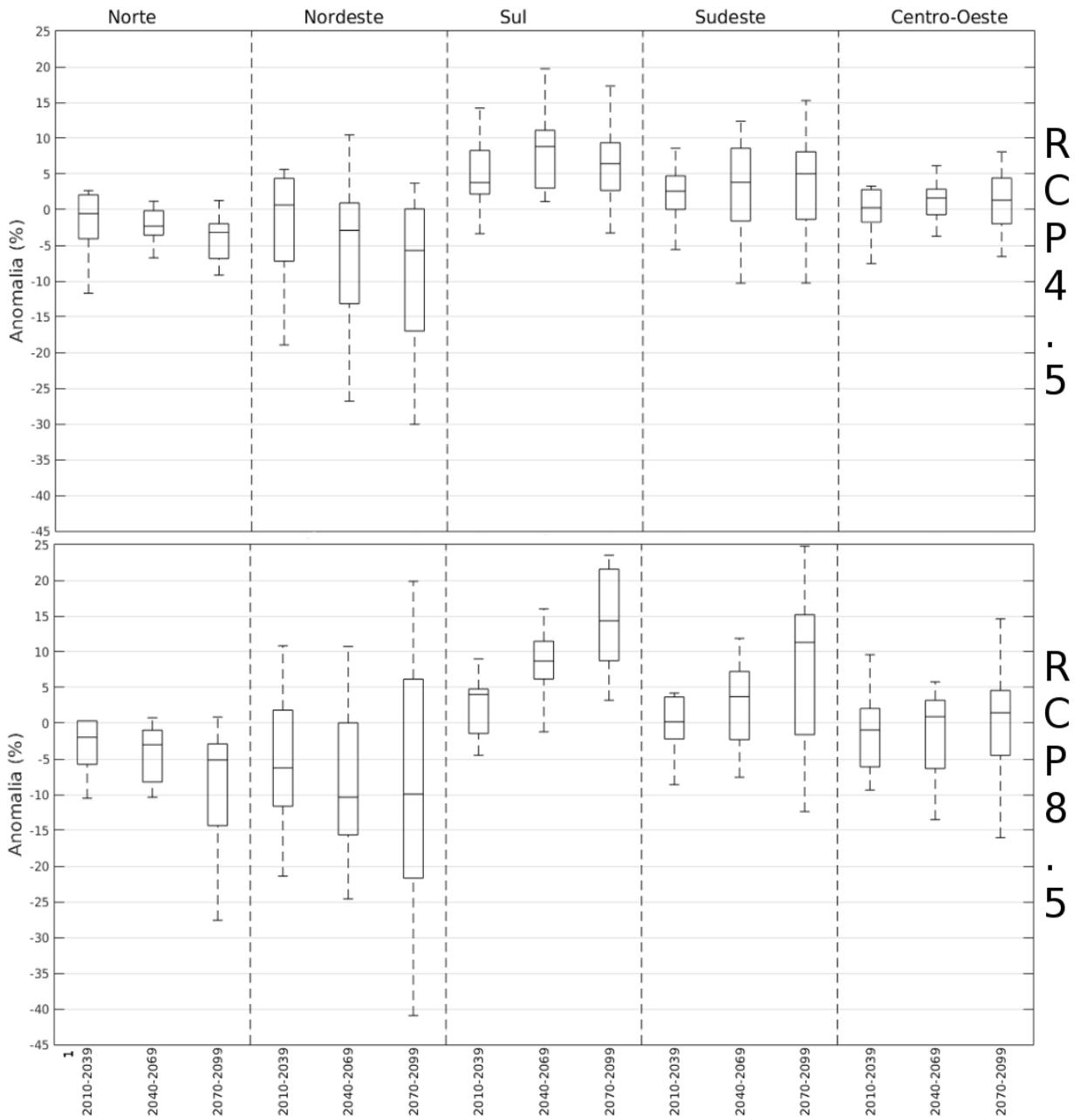


Figura 12 - Anomalia percentual de precipitação para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

5.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

As projeções apontam para aumento gradativo da evapotranspiração potencial em todas as regiões brasileiras, sinal semelhante ao encontrado para a temperatura média anual (Figura 13). O cenário RCP8.5 possui anomalias de ETP com maior magnitude, principalmente nos últimos 30 anos analisados. Ao longo do século, a projeção do cenário RCP4.5 indica que o conjunto de modelos apresentam maior divergência sobre as regiões Norte e Centro-Oeste do que para as outras regiões do Brasil. Esta característica é apontada em decorrência das incertezas associadas com as diferentes representações da biosfera, dada a complexidade dos biomas nessas regiões, dificuldades enfrentadas pelos esquemas de superfície dos modelos climáticos.

No meio do século a incerteza associada ao conjunto de modelos para a ETP é intensificada na região Sul, com diminuição na região Norte (em relação ao período histórico). Este resultado é coerente com as projeções de acréscimo de precipitação na porção sul do país e decréscimo no norte devido ao aumento da diferença de disponibilidade hídrica e aumento generalizado de temperatura próximo a superfície. O cenário RCP8.5 também indica maior espalhamento das projeções de ETP na região Centro-Oeste para a metade e final do século. As diferenças encontradas podem estar associadas com a forma que os modelos representam o feedback na vegetação, impulsionado pela maior oferta de carbono na atmosfera (ARORA *et al.*, 2013).

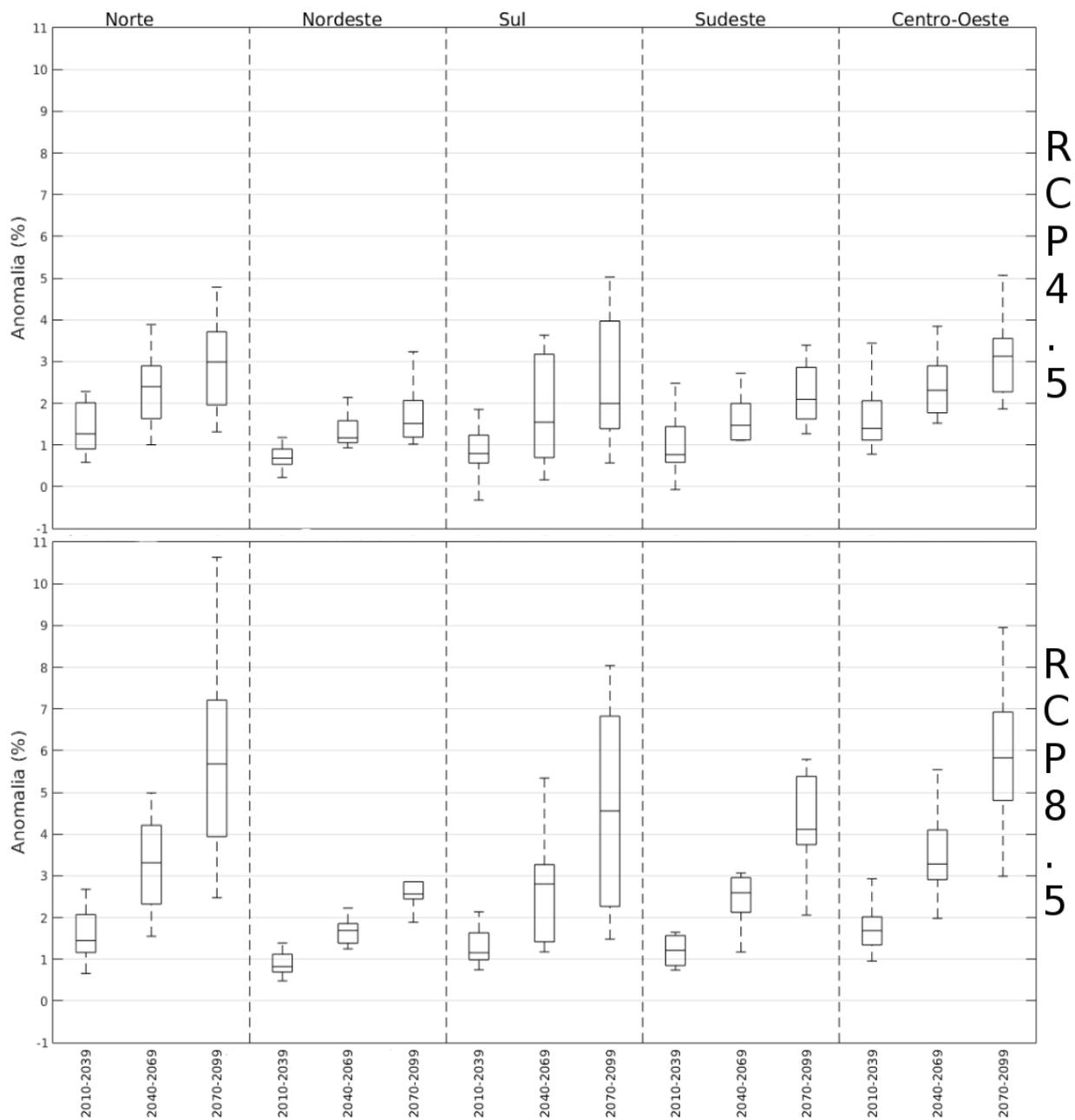


Figura 13 - Anomalia percentual de evapotranspiração potencial para os modelos do CMIP5 para as cinco regiões do Brasil referentes aos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

5.4 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA

A classificação climática com os dados do CRU, Figura 14, mostrou um padrão de distribuição de tipos climáticos semelhante ao encontrado na literatura (MENDONÇA e OLIVEIRA, 2007). Esta análise demonstra que a metodologia aplicada consegue representar bem a distribuição de climas ao longo do território brasileiro. O uso do SCC de Thornthwaite, a partir dos dados do CRU, mostrou que as Regiões Norte e Sul do país são as de climas mais úmidos, a Região Nordeste a mais árida e as Regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam climas intermediários.

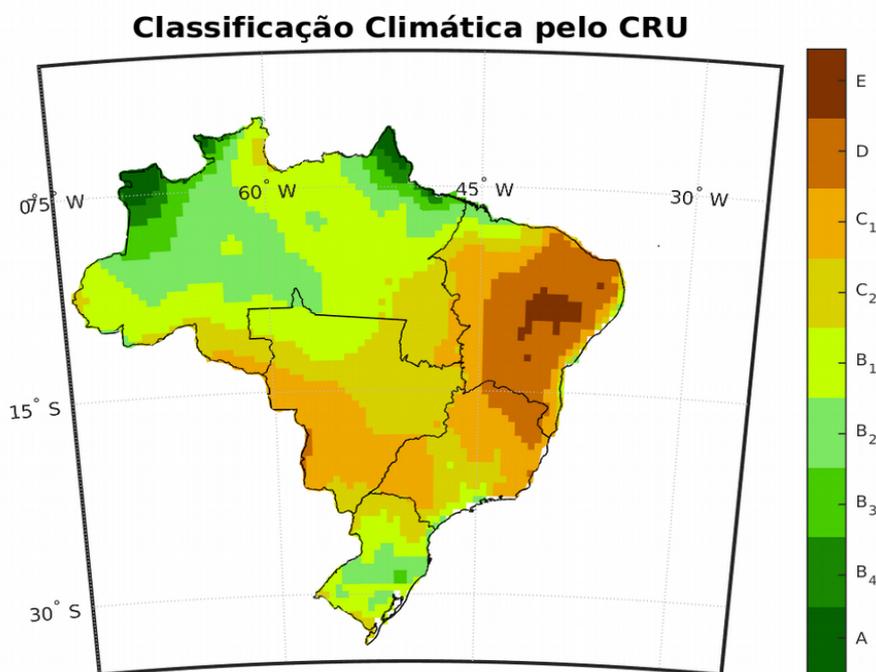


Figura 14: Classificação climática, para o território brasileiro, segundo os dados do CRU.

Após a remoção de viés os modelos apresentam distribuição espacial semelhante de tipos climáticos ao CRU como é possível observar na Figura 15. Contudo tendem a classificar a Região Nordeste como sendo mais árida do que o normal com predominância do clima tipo E, o mais árido do SCC adotado. Entre os modelos utilizados, neste trabalho, dois se destacam: o CanESM2 e o CESM1-BGC. O CanESM2 é o que apresenta um cenário mais árido, considerando a distribuição de climas em todo o território brasileiro, em especial nas Regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste. Já o CESM-1BGC apresenta um cenário mais úmido ao longo do território brasileiro.

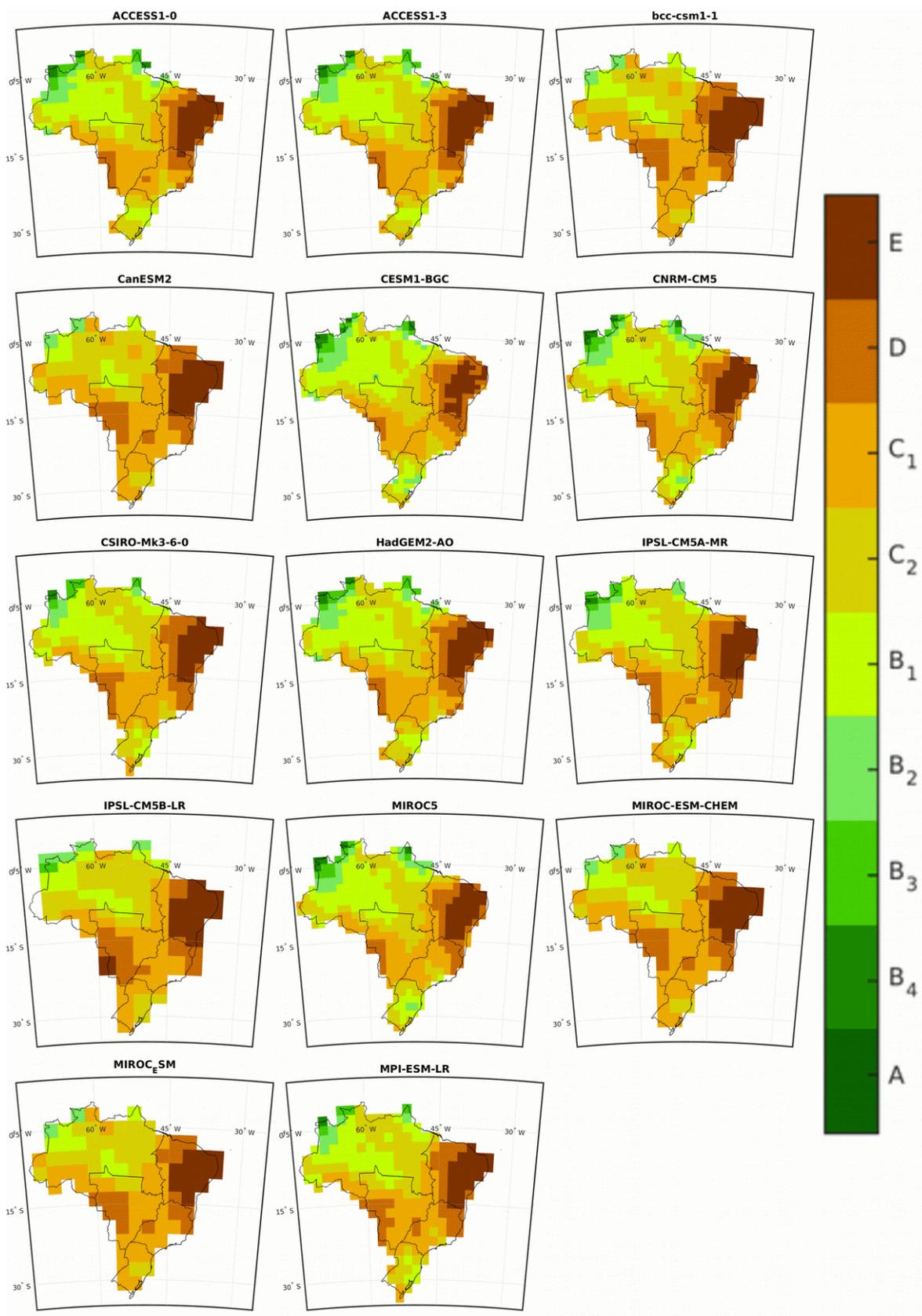


Figura 15 - Classificação climática para o período histórico (1950-1999) segundo os modelos do IPCC.

A Região Centro-Oeste é uma região com prevalência de climas intermediários, como mostrado na Figura 16a, nesta prevalece o tipo climático C1 (sub-úmido) seco, onde a maioria dos modelos mostram entre 40 e 50% do território com tal classificação. No cenário médio de emissões (RCP4.5) é mais provável uma maior redução da cobertura do tipo C1 na região (redução que pode chegar a ficar entre -25 e -30%). Alguns modelos apontam para aumentos expressivos da área coberta pelo clima D, em especial na metade do século, podendo chegar a +30% em alguns casos, indicando aumento das regiões com clima semiárido. Além disso, a maioria dos modelos concordam com a redução das áreas cobertas pelo clima úmido B1, refletido no aumento do tipo climático C2 variando entre +5%, no início do século, a +15%, no final.

O mesmo padrão é observado no cenário RCP8.5 para o clima C1. O clima D, em especial no final do século, é apontado na maioria dos modelos para um aumento da área coberta. Destaca-se também a redução da cobertura do clima B1 associado ao aumento de C2. As alterações observadas nos cenários indicam uma tendência de aumento de aridez no centro-oeste. É provável que a cobertura de climas mais amenos tenha diminuição na região central do Brasil, com maior probabilidade de evolução tênue das áreas com clima do tipo semiárido D.

A região Nordeste do país é a mais árida do território brasileiro e considerada um das mais propícias a problemas com as mudanças climáticas, possui prevalência de climas áridos e semiáridos (LIMA, CAVALCANTE e PEREZ-MARIN, 2011), conforme Figura 17, onde pelo menos de 5% da região é coberto por clima classificado como úmido (B1). No período histórico os modelos têm dificuldade de representar os campos meteorológicos da região devido à complexidade climática. Em média, os modelos classificam pelo menos 40% na categoria E (clima árido) no período histórico e 30% na classe D (clima semiárido), isso pode estar associado à baixa resolução dos modelos climáticos, implicando a perda de capacidade em representar heterogeneidades da topografia, vegetação e regiões costeiras, somadas as limitações intrínsecas às discretizações das equações físicas.

As projeções para ambos os cenários apontam para uma diminuição de clima C2 até o final do século, sobre o Nordeste brasileiro, podendo alcançar um decréscimo de 25%. Enquanto isto os climas D e E poderão avançar sobre o território da região, reduzindo a disponibilidade de água e possivelmente tornando difícil o cultivo de algumas culturas agrícolas típicas da região, o que poderia agravar os conflitos pelo uso de água na região.

A região Norte tem a maior cobertura de climas úmidos do país com prevalência dos climas B1 e C cobrindo cerca de 50% e 45% da região, respectivamente, conforme Figura 18. Nesta região os modelos apontam para uma expressiva diminuição da cobertura dos dois tipos climáticos predominantes na região em especial no cenário RCP8.5, onde todos os modelos apontam para uma diminuição da área ocupada pelo clima B1, variando entre -5% e -30%, no final do século. Em contraste com redução dos climas predominantes existe um indicativo para aumento de climas áridos, em especial o D. Maiores probabilidades de aumento da cobertura do clima D sobre a região ao longo de todo o século são indicadas pelos modelos.

O cenário RCP8.5 também projeta sobre o Norte do Brasil um expressivo aumento do tipo climático E de até 50% em relação a média histórica. O aumento da aridez na região com a maior reserva de recursos hídricos do país é preocupante, em especial para manutenção do ecossistema da Amazônia e para o setor hidrelétrico que, durante os últimos anos, tem se expandido para essa região. A redução de tais recursos pode inviabilizar a construção de novos projetos hidrelétricos na região.

A região Sudeste do país têm, segundo os modelos avaliados, predominância do tipo climático C1 (entre 50% e 80%) conforme mostrado na Figura 19a. O segundo tipo climático mais abrangente é o D (entre 20% e 30%), que conforme mostrado na Figura 14 concentra-se na parte mais a nordeste da região. Esta é uma região de clima complexo caracterizada por ser uma zona de transição entre os climas semiáridos (a nordeste) e úmidos (a sul).

Devido à grande incerteza das projeções para a região Sudeste, os modelos mostram grande dispersão na distribuição climática da região. Para o cenário RCP4.5 há uma redução mais acentuada a partir do segundo período avaliado dos climas do tipo C1 e D para a maioria dos modelos, e o aparecimento de regiões mais úmidas com climas do tipo B1 e C2. Em contrapartida tem-se a migração de alguns modelos de zonas do tipo C1 para D e de D para E, indicando que possivelmente essa região responde, espacialmente, diferente à mudanças

climáticas. O cenário RCP8.5 acentua o sinal destas alterações climáticas da classificação de Thornthwaite em relação ao RCP4.5, indicando um aumento dos tipos de clima C2 e B1 e o aparecimento de zonas com clima árido no final do século XXI.

Na Figura 20a pode-se observar que para a região Sul do país existe uma maior dispersão entre os modelos, o que aumenta as incertezas para a região, contudo o clima do tipo C2 é predominante para a maioria dos modelos, chegando a cobrir mais de 55% da região. Nesta região, os modelos sugerem um aumento dos climas mais úmidos. Enquanto os tipos climáticos C2 e C1 diminuem, os tipos B2 e B1 aumentam para ambos os cenários. Estas alterações podem significar um aumento da oferta hídrica da região.

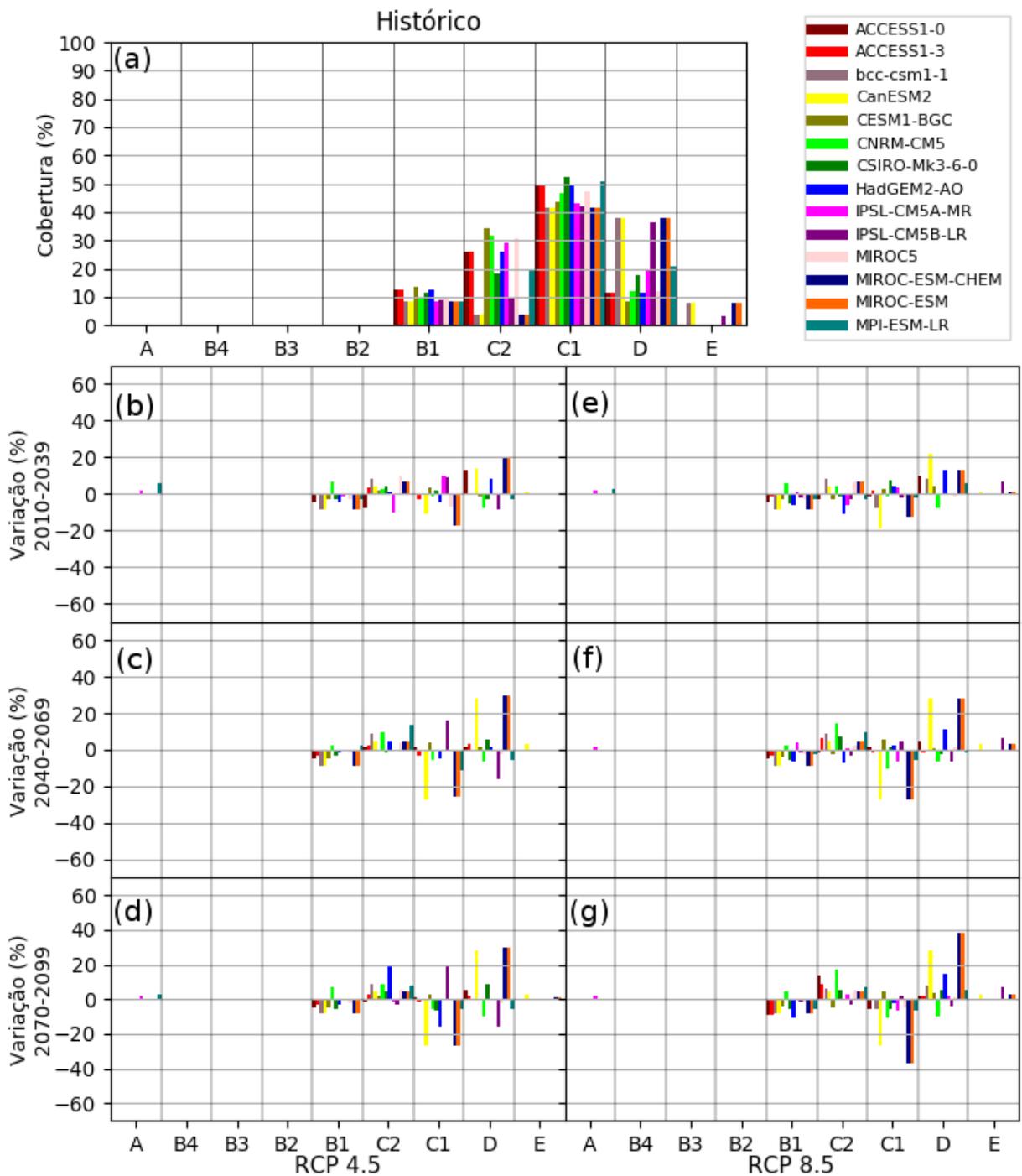


Figura 16 - Variação dos tipos climáticos na região Centro-Oeste. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d) 2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45, e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.

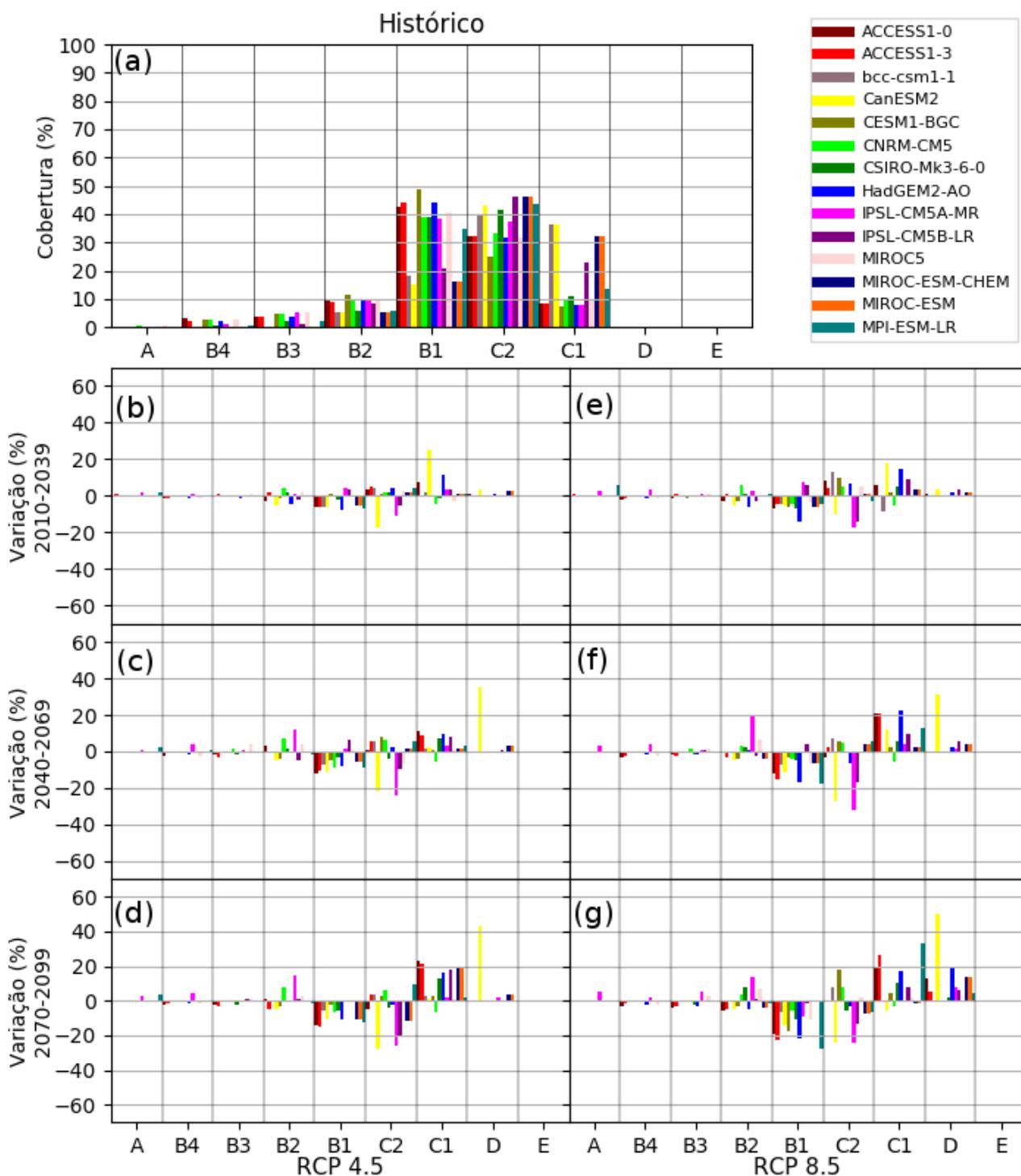


Figura 18 - Variação dos tipos climáticos na região Norte. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.

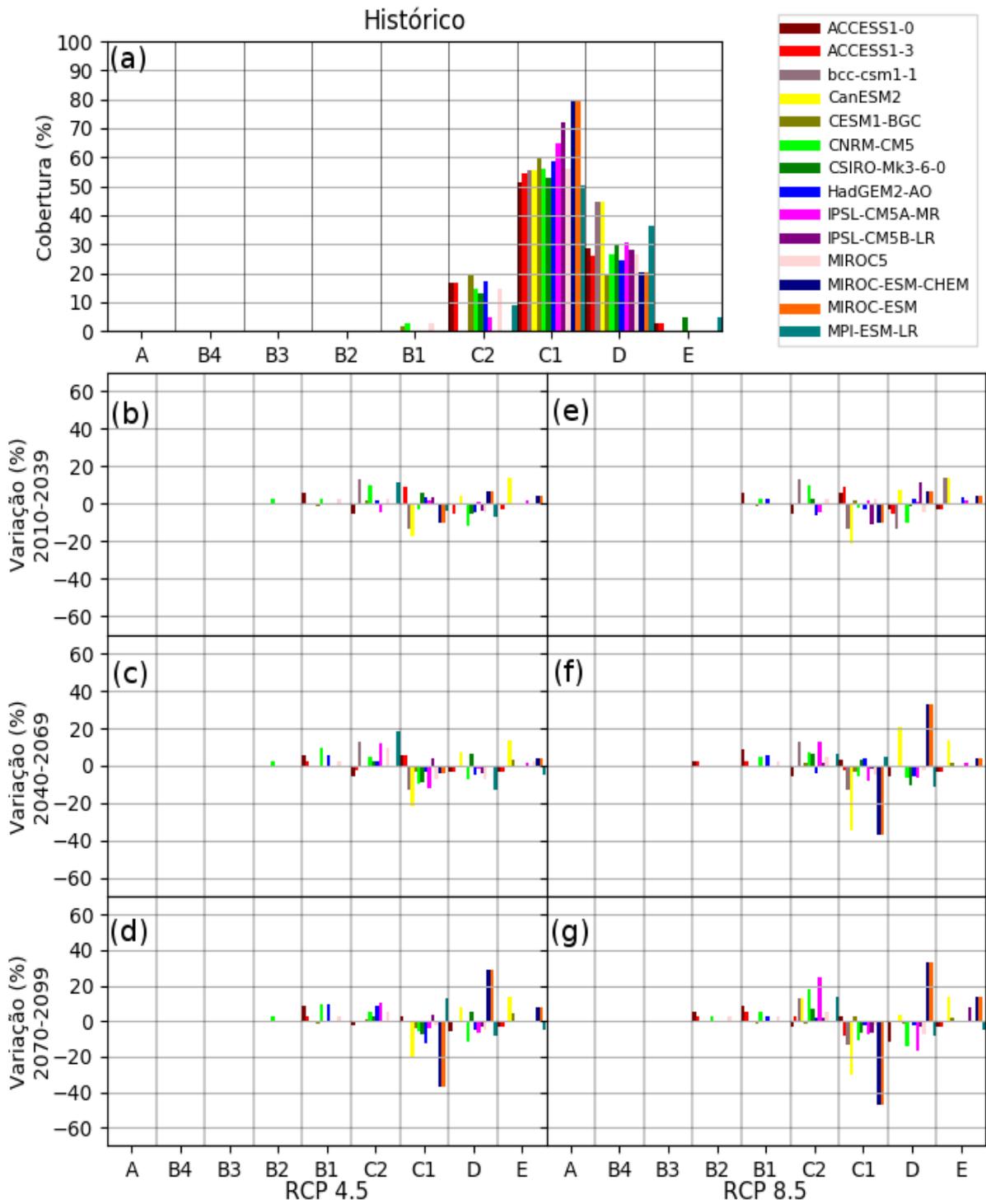


Figura 19 - Variação dos tipos climáticos na região Sudeste. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d) 2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P85-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.

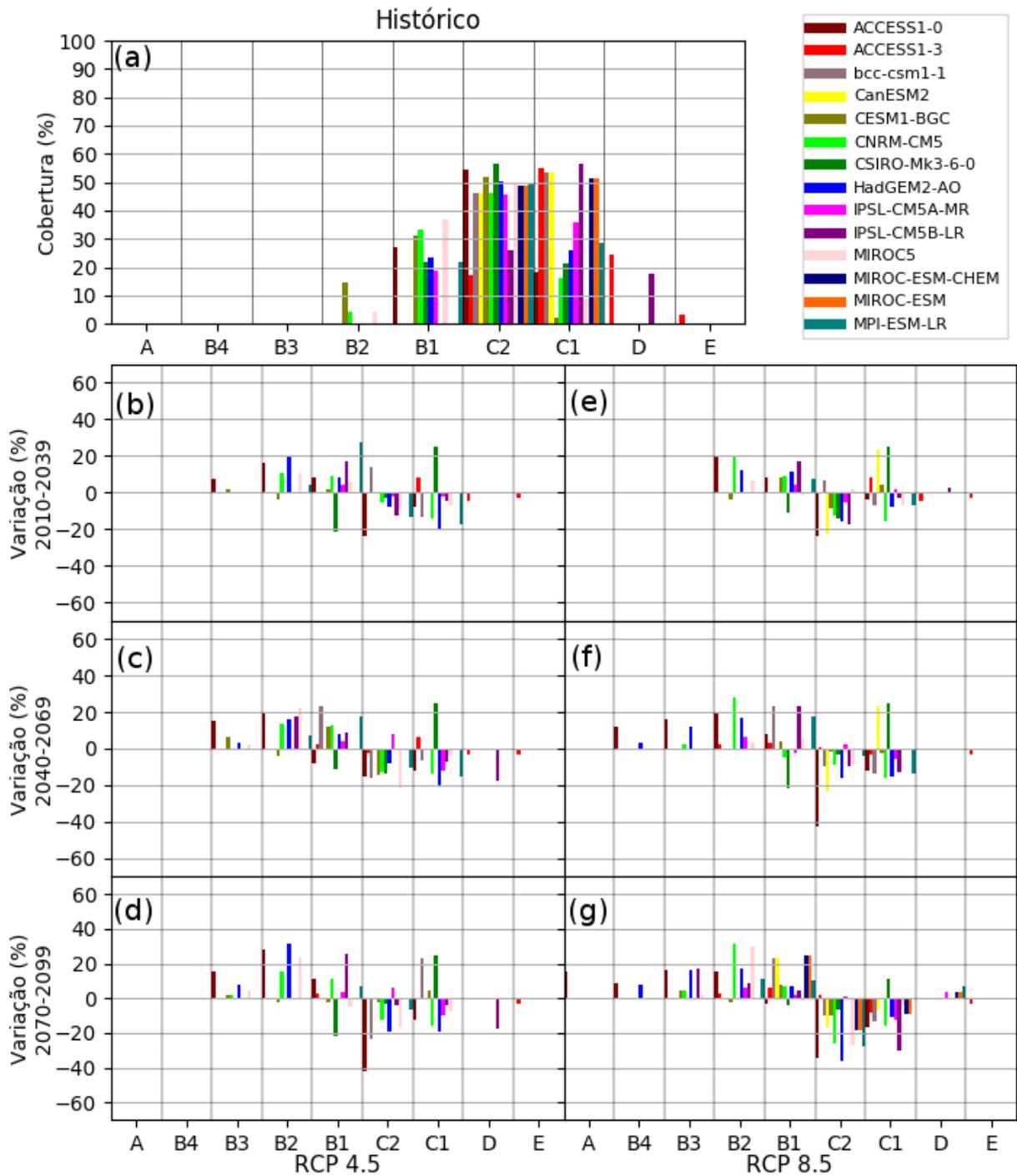


Figura 20 - Variação dos tipos climáticos na região Sul. (a) Área percentual de Cobertura de cada tipo de clima. Anomalia da área percentual coberta por classe climática tipo de clima no cenário RCP 4.5 (P45-PXX) para os períodos: (b) 2010-2039; (c) 2040-2069 e (d)2070-2099. Anomalia da área percentual coberta por tipo de clima no cenário RCP 8.5 (P95-PXX) para os períodos: (e) 2010-2039; (f) 2040-2069 e (g) 2070-2099. Onde PXX, P45 e P85 representam a área percentual coberta por classe climática tipo de clima em cada período do século.

5.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

As figuras de 21 a 23 mostram a anomalia de vazão para o Século XXI de acordo com a RCP4.5. Inicialmente (Figura 21), a maioria dos modelos apontam aumento médio na vazão para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Para a Região Norte, em especial no estado do Pará, a maioria dos modelos apontam para uma diminuição do escoamento superficial, podendo atingir redução de até 81% segundo o modelo CanESM2. Na Região Nordeste existe divergência entre os modelos gerando incertezas maiores para o futuro desta região, modelos apontam cenários de aumento, diminuição ou neutralidade do escoamento superficial.

Na metade do Século (Figura 22) as anomalias se intensificam sendo, no geral, mais seco. A maioria dos modelos passa a apresentar uma diminuição do escoamento superficial na Região Centro-Oeste em especial o CanESM-2 que aponta uma redução de até 81%. A Região Norte permanece com a tendência de diminuição do escoamento superficial. Para a região Nordeste os modelos se dividem metade aponta um cenário de menor escoamento enquanto a outra metade aponta um cenário de aumento. As demais regiões (Sul e Sudeste) continuam com sinal de aumento do escoamento superficial.

No final do Século (Figura 23) as anomalias aumentam mais. Destaque para o CanESM2 por apresentar o cenário mais seco dentre os modelos em estudo. Os modelos HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 apresentam uma neutralidade da anomalia de escoamento superficial em todo o território brasileiro, este comportamento pode ter sido causado por deficiência no modo de remoção do viés adotado. Para a Região Nordeste a maioria dos modelos passa a apresentar um cenário de menor escoamento superficial. Para as demais regiões do país é observado um comportamento na anomalia semelhante aos do período anterior, diferenciando apenas na intensidade das mudanças que passa a ser maior.

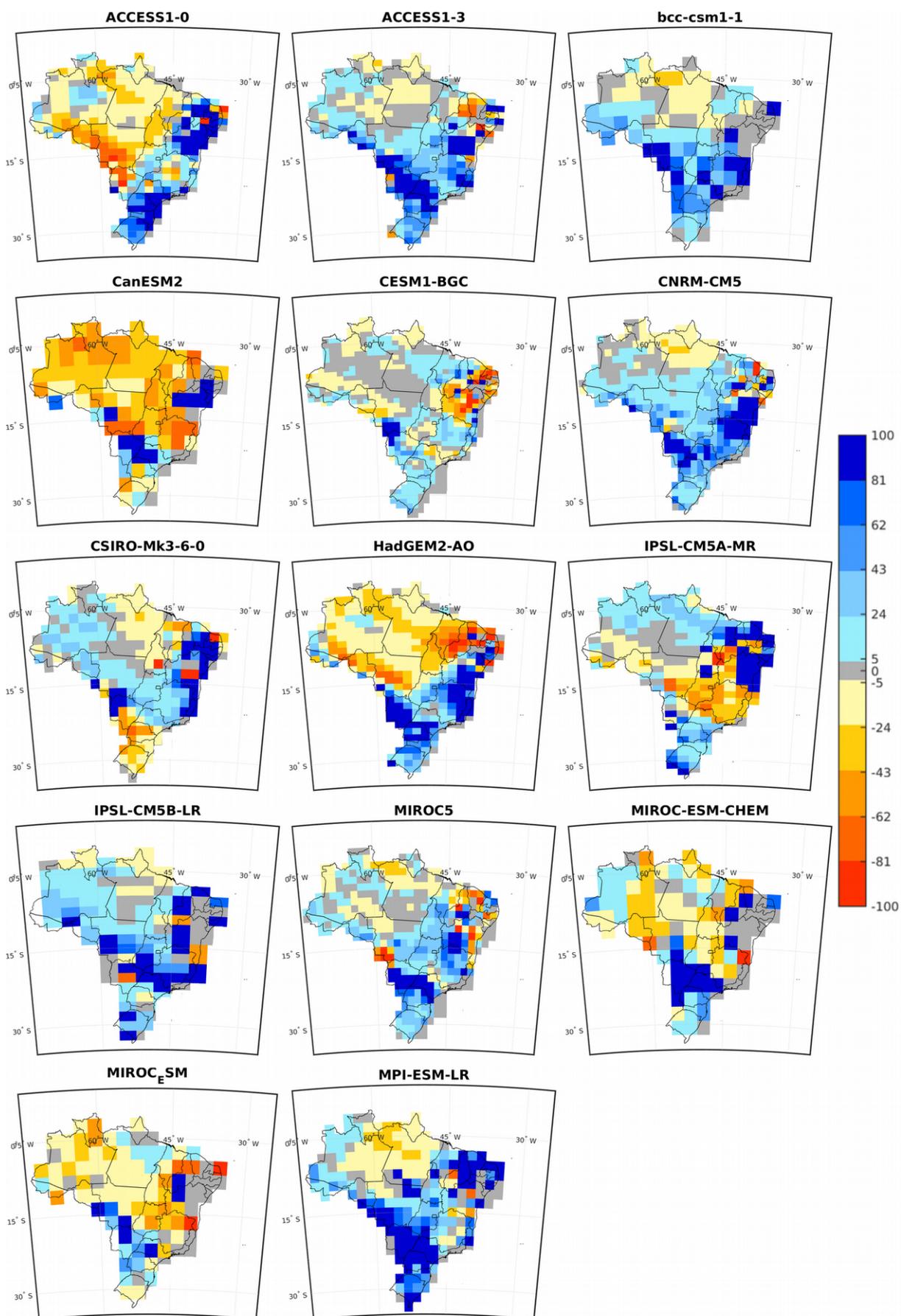


Figura 21: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2010-2049

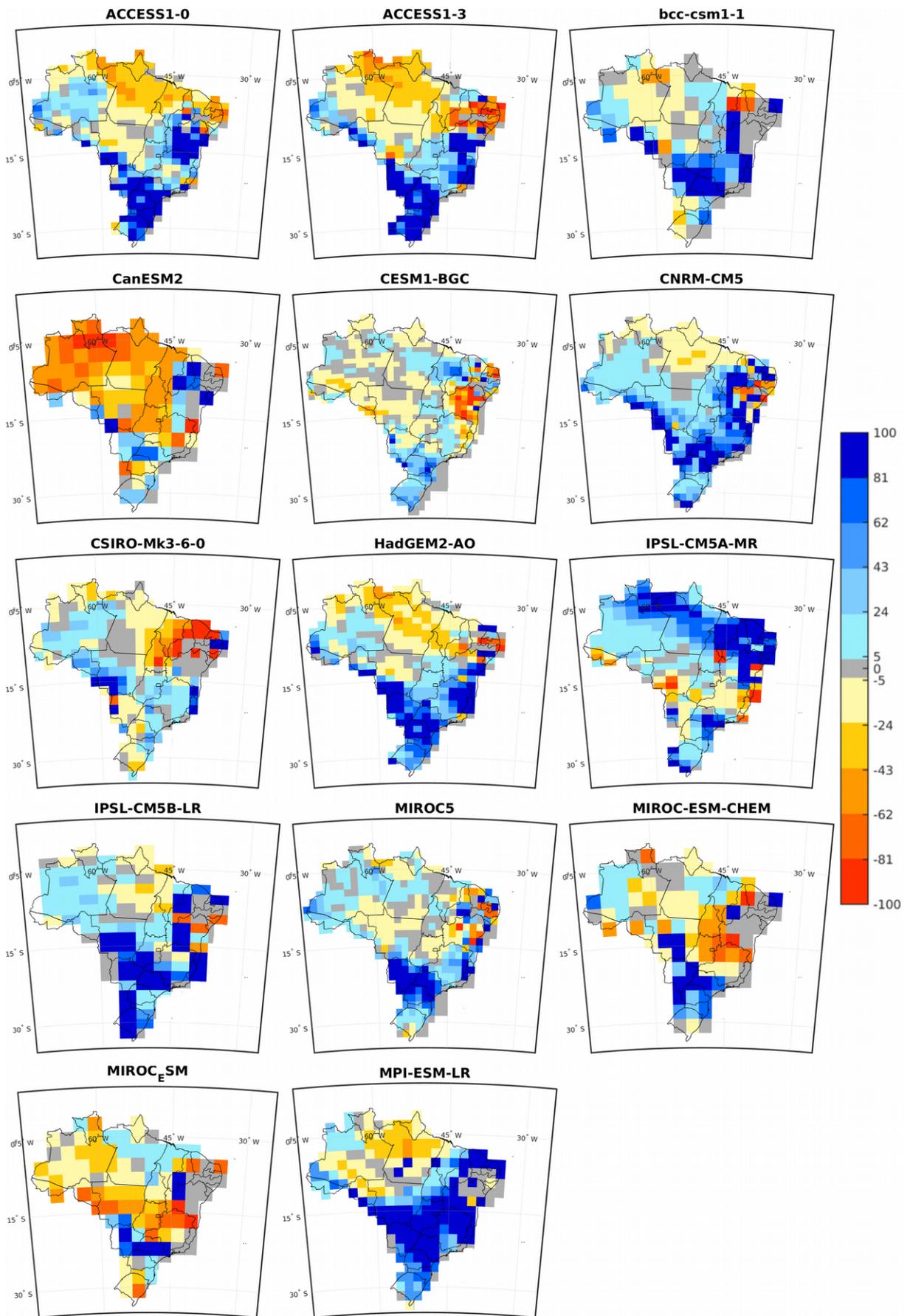


Figura 22: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2040 a 2069.

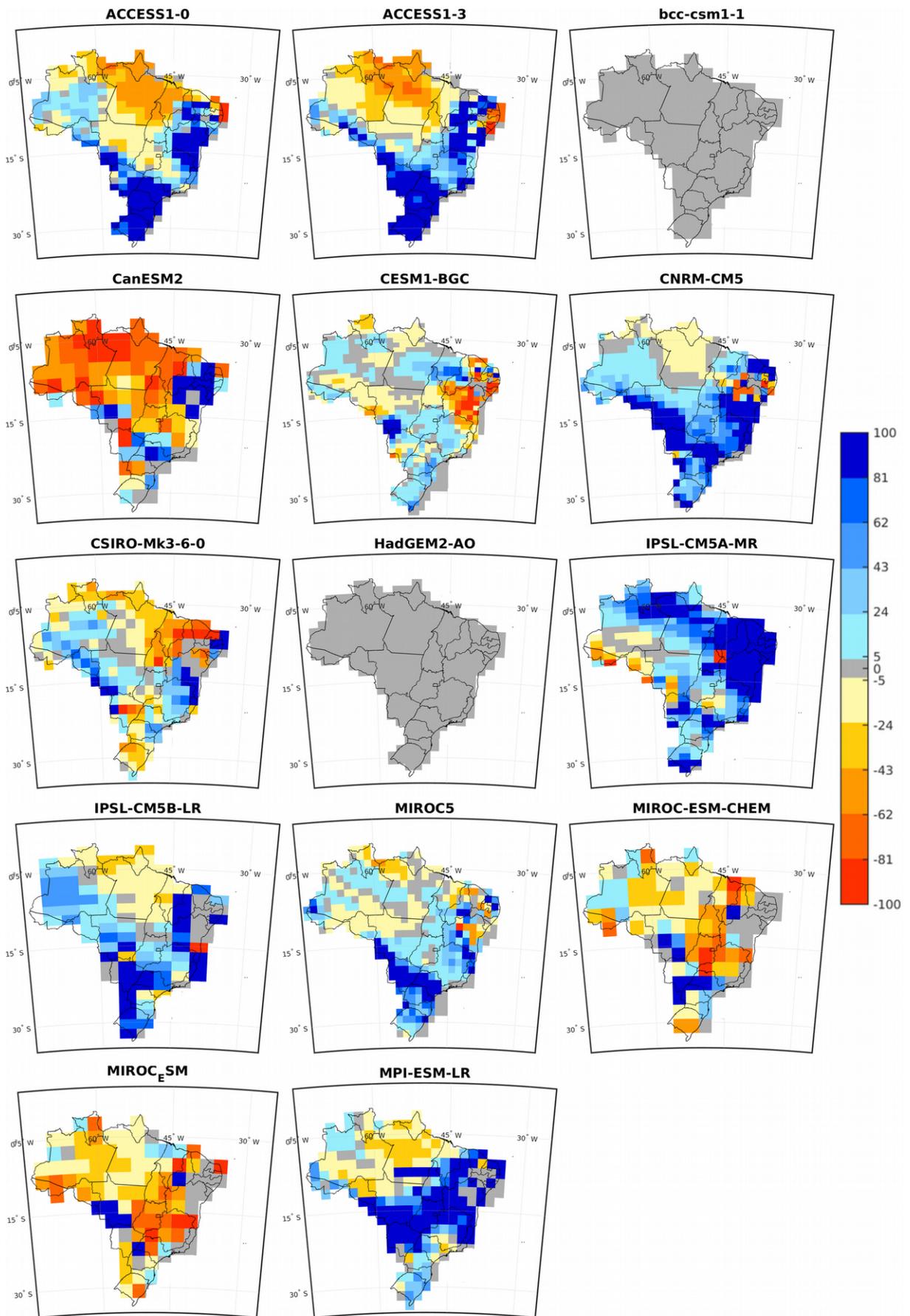


Figura 23: Anomalia de vazão por modelos da RCP4.5 para o período de 2070 a 2099.

As figuras de 24 a 26 mostram as anomalias de vazão projetadas de acordo com os modelos da RCP8.5. Em geral, estas projeções demonstram anomalias ainda mais negativas, se comparadas com as do RCP4.5. Para o período de 2010 a 2039 (Figura 24) a Região Norte desponta com as anomalias mais negativas, entre todas as regiões. Na Região Nordeste os modelos também geram incertezas apontando cenários tanto mais úmidos, secos ou até mesmo neutros, contudo, em relação as projeções da RCP 4.5 para o mesmo período, mais modelos projetam anomalia positiva de escoamento para esta região. Nas Regiões Sul e Sudeste são projetadas anomalias positivas de escoamento. Para a Região Centro-Oeste a maioria dos modelos apresenta um cenário mais árido que o de referência.

Para o período de 2040 a 2069, mostrado na Figura 25, alguns modelos mostram uma clara divisão entre o Sul (mais úmido) e o Norte (mais árido) do país. Na Região Nordeste a maioria dos modelos apontam para um cenário de menor oferta hídrica, porém alguns dos modelos apresentam a possibilidade de aumento. Na Região Norte apenas o modelo IPSL-CM5A-MR aponta para um aumento do escoamento superficial os demais modelos apontam para diminuição (maioria) ou neutralidade da variação. Na Região Centro-Oeste as incertezas são maiores pois metade dos modelos apontam aumento e a outra metade a diminuição do escoamento superficial. As regiões Sul e Sudeste tem um indicativo para aumento do escoamento superficial em todos os modelos.

A final do Século (período de 2070 a 2099), mostrado na Figura 26, os modelos bcc-csm1-1 e HadEM2-AO têm o mesmo comportamento observado para a RCP4.5. Grandes diminuições de escoamento superficial são apontadas para as regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste. A Região Sul continua com tendência de aumento do escoamento superficial. No Nordeste existem incertezas associadas ao escoamento superficial por haver divisão entre modelos que apontam tendências de aumento, diminuição ou neutralidade.

As anomalias negativas de escoamento superficial, observadas principalmente na Região Norte, poderão comprometer os projetos hidrelétricos feitos para esta região. Isto pode ocorrer pois diminuição do escoamento superficial significa redução das vazões dos rios e conseqüentemente da energia capaz de ser produzida pelas hidrelétricas. Poderiam ser feitos para aproveitar melhor os potencial hidrelétrico das Regiões Sul e Sudeste, que apresentam tendência de aumento do escoamento superficial em ambas as RCP's.

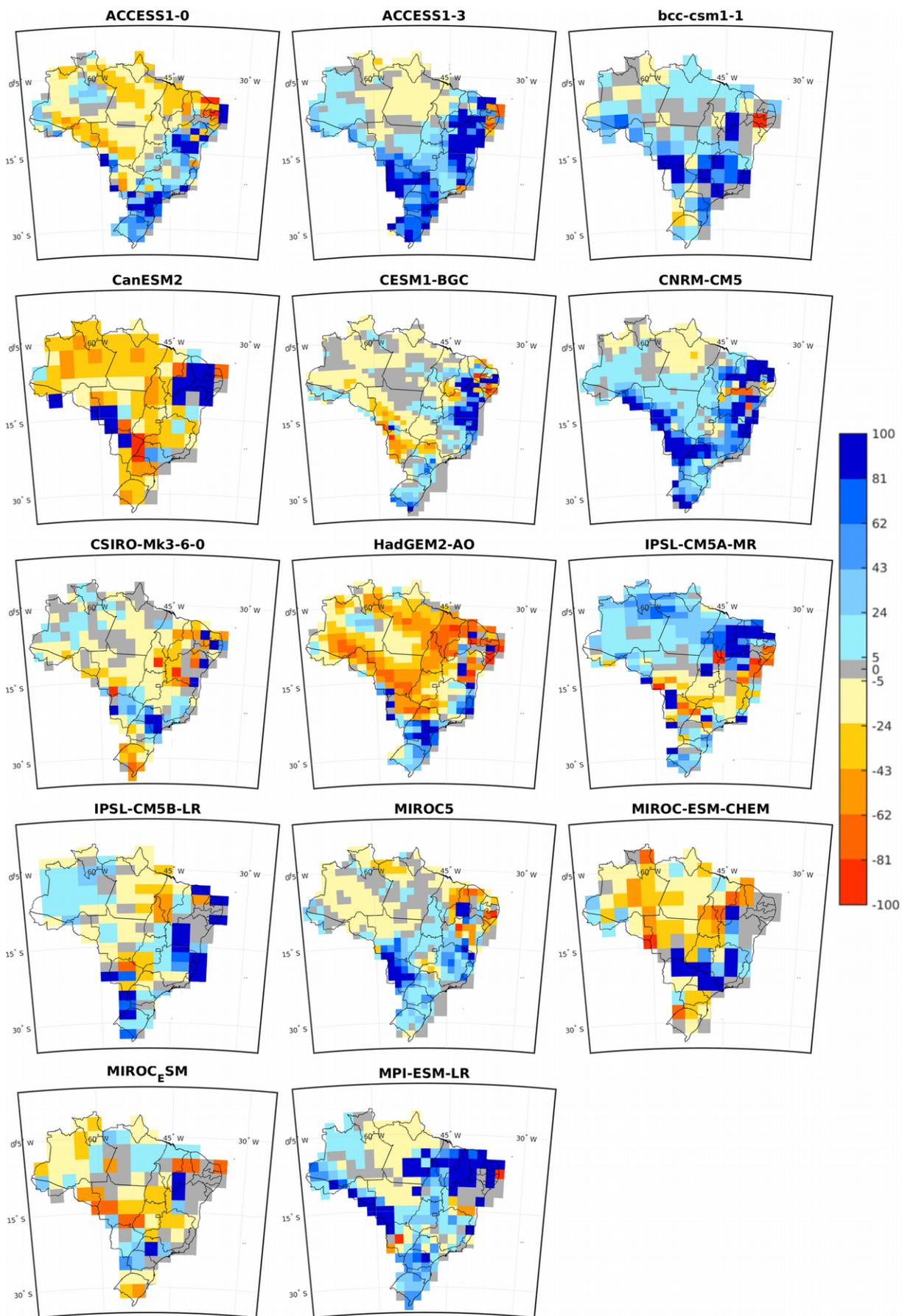


Figura 24: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período e 2010 a 2049.

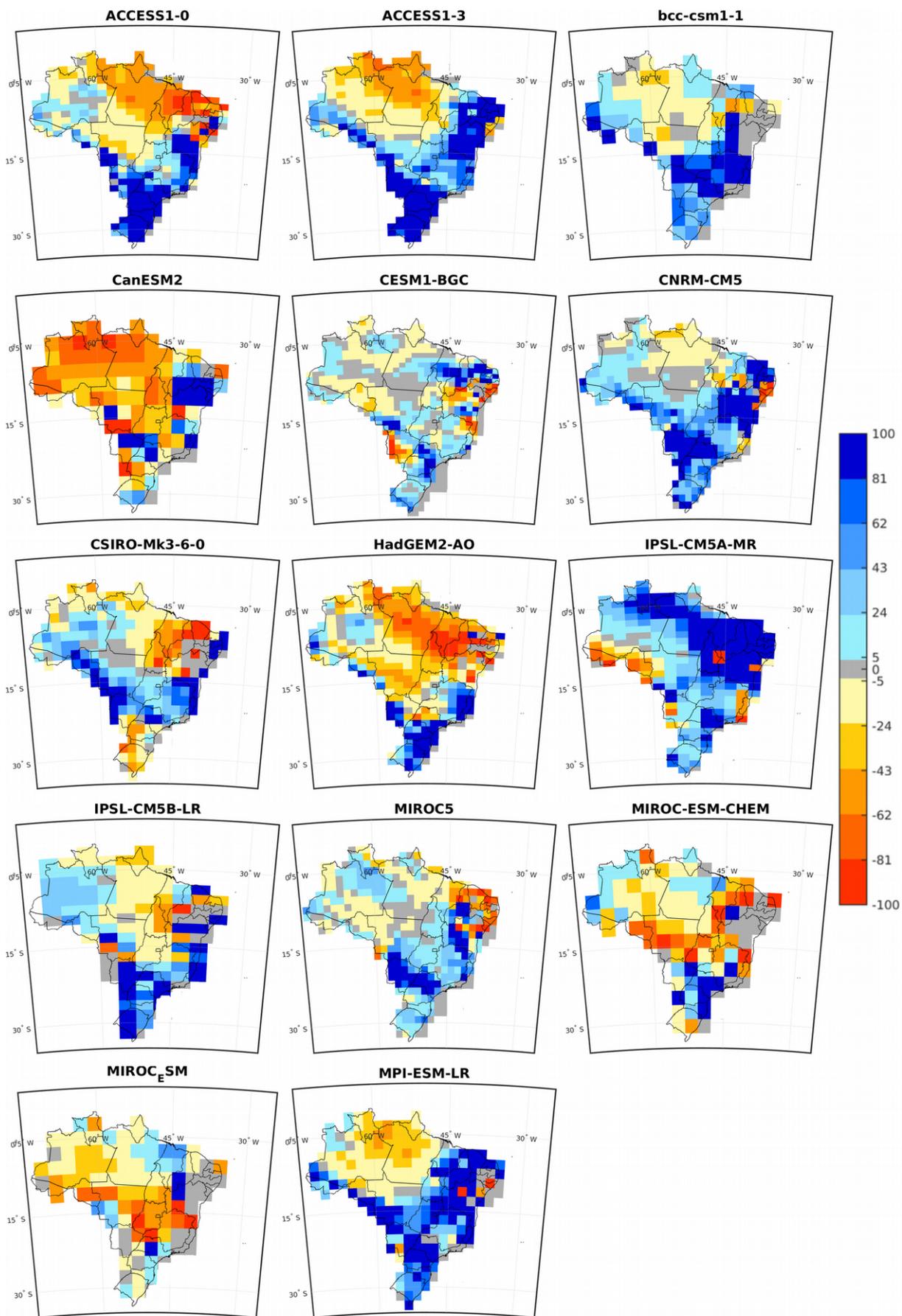


Figura 25: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período de 2040-2069.

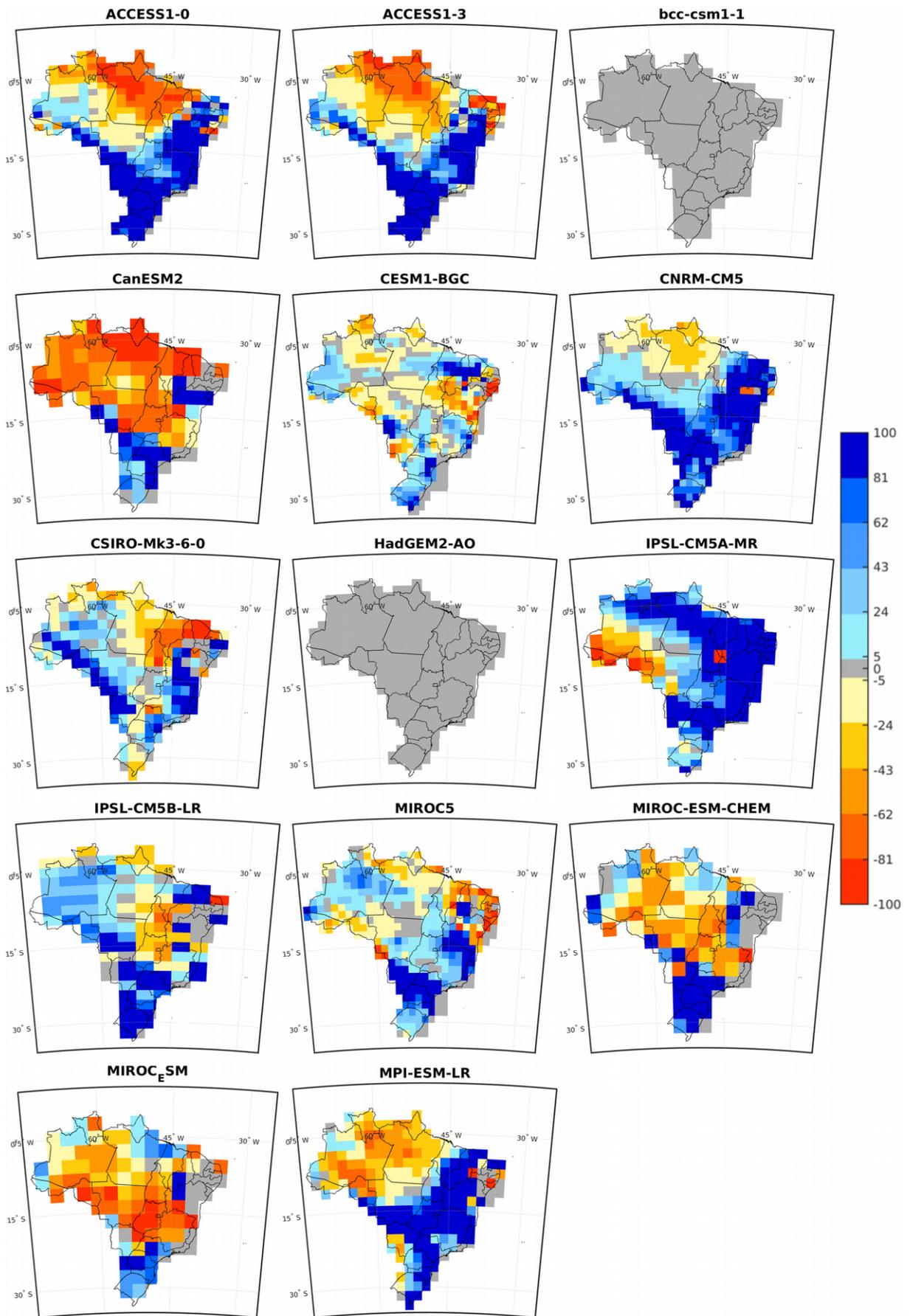


Figura 26: Anomalia de vazão por modelos da RCP8.5 para o período de 2070 a 2099.

6 CONCLUSÕES

Os modelos do IPCC-AR5 apontam para impactos diferentes de acordo com as regiões do Brasil selecionada, indicando divergências quanto o futuro da precipitação e do escoamento superficial no país, contudo todos concordam com o aumento de temperatura e evapotranspiração potencial em todo território brasileiro.

Há uma maior possibilidade de aumento das regiões com climas úmidos no Sul do país, ao passo que na região Norte e Centro-oeste há uma sinalização de aumento das zonas semiáridas. Enquanto na região Nordeste há uma sinalização de aumento das zonas com clima árido. Na região Sudeste existe divergência, porém a maioria dos modelos projeta aumento dos climas úmidos. Os resultados encontrados para o setor Norte concordam com os obtidos por Lucena *et al.* (2009) que obteve uma cenarização da matriz energética do país utilizando informações do IPCC-AR4 e mencionou aumento da vulnerabilidade das regiões Norte e Nordeste do Brasil.

A tendência de aumento de climas áridos no Nordeste Brasileiro e Centro-Oeste do país, aliado ao crescimento da demanda por água, sugere que medidas estruturais, como a transposição do rio São Francisco, sejam tomadas a fim de minimizar os futuros problemas de abastecimento e conflitos pelos múltiplos usuários de água. O aumento de regiões úmidas no Sul do país pode representar um aumento no escoamento superficial médio e máximo, representando uma maior possibilidade de eventos extremos de cheias na região. Na Região Norte, o aumento de áreas áridas coloca em dúvida a viabilidade de novos investimento de hidrelétricas na região.

O aumento da ETP reflete em uma maior necessidade de água para irrigação no país. O fato destas anomalias serem mais intensas no cenário RCP8.5, indicam que medidas precisam ser adotadas para minimizar a emissão de gases do efeito estufa e os impactos das mudanças climáticas, em busca de reduzir a vulnerabilidade dos sistemas hídricos brasileiros e minimizar o acirramento nos conflitos pelo uso da água no país.

As mudanças climáticas representam um desafio para a gestão de recursos hídricos, à medida que geram um conjunto de alterações que afetam o ciclo hidrológico. Além dos

impactos esperados no regime hidrológico, esperam-se prováveis mudanças na demanda de diversos setores usuários. A elevação da temperatura e da evapotranspiração poderá acarretar, entre outros efeitos, maior necessidade de irrigação, refrigeração, consumo humano e dessedentação de animais em determinados períodos e regiões. Essas constatações estão associadas a um estado geral de aumento no consumo de energia, na demanda hídrica da agricultura e do abastecimento humano nos centros urbanos. Assim, as consequências das mudanças climáticas podem alterar a confiabilidade dos sistemas de água atual brasileiro e a gestão dos usos e das infraestruturas de suprimento.

Para trabalhos futuros pode ser feita a análise da variação sazonal das projeções dos modelos de modo a verificar como os padrões climáticos poderão variar sua distribuição ao longo do ano. O uso de mais modelos pode oferecer uma melhor compreensão das potenciais mudanças climáticas. A correção de viés utilizando outros métodos estatísticos, como a função gama, poderá oferecer melhores resultados, em especial para a precipitação, haja vista a possibilidade de o método adotado neste trabalho poder gerar valores corrigidos negativos o que fisicamente não é possível. A partir dos resultados obtidos nesse trabalho também é possível realizar uma análise mais detalhada de como tais mudanças poderão impactar cada um dos setores energéticos que compõem a matriz energética, avaliando potenciais impactos no mercado, oferta e demanda de energia.

BIBLIOGRAFIA

- ALLISON, I. The science of climate change: questions and answers. **Australian Academy of Science**, n. February, p. 1–44, 2015.
- ANA, Agência Nacional de Águas **CONJUNTURA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL – 2013**. Brasília: ANA, 2013.
- APARECIDO, L. E. DE O. et al. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brasil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 405–417, 2016.
- ARORA, V. K. et al. Carbon–concentration and carbon–climate feedbacks in CMIP5 Earth system models. **Journal of Climate**, v. 26, n. 15, p. 5289–5314, 2013.
- BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: A mudança do cima e o desenvolvimento**. São Paulo: World Bank, 2010.
- Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, CAMARGO, A. DE. **Classificação climática para zoneamento de aptidão agroclimática**. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Viçosa, MG. **Anais...**1991
- CUBASCH, U., D. *et. al.* **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes**. United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.
- CUNHA, A. R. DA; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 01, 2009.
- DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. Cenários de mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos na região Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 42, n. 2, p. 229–246, 2016.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. 2. ed. Brasil: EPE, 2016. v. 14
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. EPE. Brasília: MME/EPE, 2015
- FERNANDES, R. O. et al. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 1, p. 1–12, 2017.

FLATO, G. et al. Evaluation of Climate Models. 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*. **Climate Change 2013**, v. 5, p. 741–866, 2013.

GALLARDO, C. et al. Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen–Trewartha classification. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 9, p. 2157–2166, 2013.

GUIMARÃES, S. DE O. **PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O NORDESTE BRASILEIRO DOS MODELOS DO CMIP5 E DO CORDEX**. Dissertação —Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2015.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Appl. Eng. Agric**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Clima do Brasil**. 1 mapa. Escala 1:5 000 000. Rio de Janeiro. 2002. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>> Acesso em. Mai. 2017

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change **Climate Change 2008: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer], 2008.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectorial Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Reino Unido e New York, NY, USA: [Core Writing Team, Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White], 2014.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge: IPCC, 2007.

- JACOBET, J. Classifications in climate research. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 35, n. 9, p. 411–421, 2010.
- JYLHÄ, K. et al. Observed and projected future shifts of climatic zones in Europe and their use to visualize climate change information. **Weather, Climate, and Society**, v. 2, n. 2, p. 148–167, 2010.
- KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 1948.
- KIM, J. et al. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. **Science of the Total Environment**, v. 452, p. 181–195, 2013.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*, Justus Perthes, Gotha. 1928.
- LIMA, R. DA C. C.; CAVALCANTE, A. DE M. B.; PEREZ-MARIN, A. M. Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Campina Grande: INSA-PB**, 2011.
- LIU, J. et al. China's rising hydropower demand challenges water sector. **Scientific reports**, v. 5, 2015.
- LUCENA, A. F. P. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009.
- MALUF, J. R. T. A new climatic classification for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 141–150, 2000.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 245–259, 1945.
- MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e Regionais: Avaliação do Clima Atual do Brasil e Projeções de Cenários Climáticos do Futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 01-18, 2001.
- 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**. MMA, Ministério do Meio Ambiente, 2006.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5–28, 2007.
- MENDONÇA, F.; OLIVEIRA, I. M. D. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos, 2017.

- MOSER, S. C.; EKSTROM, J. A. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 51, p. 22026–22031, 2010.
- MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.
- NAVEIRO, A. P.; MAÇAIRA, P. M.; OLIVEIRA, F. L. C. **Energia Natural Afluyente por subsistema do Brasil: uma análise de representatividade da Média de Longo Termo (MLT)**. LVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Vitória-ES, 2016.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e o Brasil–Contextualização. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 07–18, 2008.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 239–258, 2001.
- ONU, Organização das Nações Unidas. **Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptation in Developing Countries**. Bonn: UNFCCC, 2007.
- Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. BMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Brasil: Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, Volume Especial para a Rio+20, PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, p. 34, 2012.
- PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **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.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp. 2014.
- PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1**. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. p. 24, 2013.
- ROLIM, G. DE S. et al. Climatic classification of Köppen and Thornthwaite systems and their applicability in the determination of agroclimatic zoning for the state of São Paulo, Brazil. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.

- ROSSATO, L. Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil. **São José dos Campos**, 2001.
- ROTHAUSEN, S. G.; CONWAY, D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 4, p. 210–219, 2011.
- SCANLON, B. R.; DUNCAN, I.; REEDY, R. C. Drought and the water–energy nexus in Texas. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 4, p. 045033, 2013.
- SCHAEFFER, R. et al. Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil. **Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ**, 2008.
- SHIKLOMANOV, I. A. World water resources. **A new appraisal and assessment for the 21st century**, 1998.
- SILVEIRA, C. S. et al. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste Do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, 317-330, 2013.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. Centerton, Drexel Institute of Technology-Laboratory of Climatology, 104p. **Publications in climatology**, v. 8, n. 1, 1955.
- UEA, UNIVERSITY EAST ANGLIA. **Climatic Research Unit. CRU**. Disponível em: <<http://www.cru.uea.ac.uk/>>. Acesso em: 05 agosto 2015
- VAN VLIET, M. T. et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nature Climate Change**, 2016.
- VAN VLIET, M. T. et al. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 9, p. 676–681, 2012.
- VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, n. 1–2, p. 5, 2011.
- Winther, 2013: Introduction. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**.