



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS –
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA

**EXTREMOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA LEGAL
BRASILEIRA: CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES**

ANNA CAROLINA FERNANDES BAZZANELA

RIO DE JANEIRO

Junho/2025

Anna Carolina Fernandes Bazzanella

**EXTREMOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA: CLIMA
PRESENTE E PROJEÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski
Coorientador: D. Sc. Wanderson Luiz-Silva

Rio de Janeiro

Junho/2025



UFRJ
faz **100**
ANOS
1920 | 2020



Departamento de
METEOROLOGIA
Universidade Federal do Rio de Janeiro

EXTREMOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA: CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES

ANNA CAROLINA FERNANDES BAZZANELA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

PROFA. DRA. CLAUDINE PEREIRA DERECZYNSKI (PPGM-IGEO-UFRJ)

PROF. DR. WANDERSON LUIZ-SILVA (PPGM-IGEO-UFRJ)

PROFA. DRA. CHOU SIN CHAN (PPGM-IGEO-UFRJ)

PROFA. DRA. IRACEMA FONSECA DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI (INPE)

PROF. DR. ANDRÉ DE ARRUDA LYRA (INPE)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2025

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGM), Instituto de Geociências (IGEO),
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP:
21941-916.

Tel.: 55 (21) 3938-9540. E-mail: "Programa de Pós-graduação em Meteorologia - PPGM"
<pos_meteoro@igeo.ufrj.br>

CIP - Catalogação na Publicação

Fernandes Bazzanela, Anna Carolina
Extremos Climáticos na Amazônia Legal Brasileira:
Clima Presente e Projeções / Anna Carolina
Fernandes Bazzanela. -- Rio de Janeiro, 2025.
93 f.

Orientadora: Claudine Pereira Dereczynski.
Coorientador: Wanderson Luiz Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2025.

1. Mudanças Climáticas. 2. Extremos. 3. CMIP6. I. Pereira Dereczynski, Claudine, orient. II. Luiz Silva, Wanderson, coorient. III. Título.

*A soul in tension that's learning to fly,
condition grounded but determined to try*

Pink Floyd – Learning to Fly

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a minha família. Aos meus pais, Gelson e Fabiana, por todo o zelo, incentivo e apoio que recebi ao longo de toda minha vida até aqui. Ao meu esposo, Marcio, por todo amor, paciência e cuidado, principalmente nos dias em que quase fui vencida pelo cansaço de conciliar o trabalho com os estudos. E também aos meus “filhos” felinos, Machado, Margot e Pippin, que preenchem meu coração de alegria e afeto todos os dias. É imensurável a gratidão que sinto por toda dedicação que recebi dessas pessoas tão especiais que me guiaram com tanto amor até aqui.

Aos meus orientadores Claudine Dereczynski e Wanderson Luiz-Silva, pela excelente orientação e por todo apoio, parceria e amizade; suas singularidades marcaram minha trajetória de uma forma única e muito especial. Por isso, agradeço profundamente a Claudine, que sempre me aconselhou e orientou com muita ternura e paciência nesses exatos 7 anos (graduação e mestrado); e ao Wanderson, que com seu jeito descontraído e leve, fez com que toda e qualquer dificuldade parecesse insignificante, tornando tudo mais fácil. Meus sinceros agradecimentos a todos os professores do departamento de Meteorologia, em especial a Chou, que assumiu a missão de compor essa banca juntamente com o André e a Iracema, que também aceitaram o convite.

Por último, e não menos importante, queria agradecer aos meus amigos, que são a segunda família que a vida me deu e sem eles esta trajetória teria sido muito mais difícil. Primeiramente, ao Juan e à Isabella, com quem compartilhei minhas dores, além de boas conversas e risadas durante esse período. Meu imenso obrigado à minha amiga Liz, que esteve comigo desde o início da minha vida acadêmica. Também sou grata aos meus amigos Roberto, Leonardo, Luiza, Raphael e Rute, os quais dividi momentos incríveis além dos muros da UFRJ. Por fim, meus sinceros “muito obrigada” à todos aqueles que não mencionei nesse pequeno parágrafo, mas que também estiveram comigo em algum momento desta jornada.

Resumo

O objetivo deste estudo é caracterizar o comportamento dos extremos de temperatura do ar e da precipitação na região da Amazônia Legal Brasileira (ALB) no clima presente e investigar suas projeções até o final do século. A base de dados BR-DWGD é utilizada para caracterizar o clima presente e 12 modelos do Projeto de Intercomparação dos Modelos Acoplados-6 (CMIP6), sob cenário Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP5-8.5) são usados para investigar as mudanças futuras em relação ao período de referência (1995-2014). O trabalho utiliza testes estatísticos como o de Mann-Kendall para avaliar a significância estatística das tendências observadas, e o teste t de Student para apontar a robustez das mudanças projetadas. Os resultados mostram uma tendência de aquecimento no clima presente em toda a ALB, sendo mais pronunciado nos setores Sul (S) e Nordeste (NE), onde as menores temperaturas mínimas (TNn) sofrem um aumento em torno de 1°C/década em algumas áreas. No NE, observa-se uma redução de 34 dias/década na quantidade de noites frias no ano (TN10p). No futuro, o aquecimento se manterá em toda a ALB, mas no NE projeta-se menor aquecimento do que no Noroeste (NO) e no S. No S e NO, as maiores temperaturas máximas (TXx) aumentarão em média 7°C no final do século. Em relação aos extremos de precipitação, no NO, porção atualmente mais úmida da ALB, observa-se um aumento significativo dos dias úmidos consecutivos (CWD), mas com uma redução em torno de 60 mm/década na intensidade das chuvas extremas (R95p), o que pode indicar uma melhor distribuição temporal das chuvas nessa porção da ALB. No futuro, no entanto, os modelos projetam o oposto no NO: redução do CWD e aumento dos valores de R95p. No NE, observa-se uma redução significativa do R95p, em torno de 20 mm/década, enquanto no final do século projeta-se um aumento de 30 dias em relação ao número total de dias secos consecutivos no ano (CDD), combinado com uma redução no total pluviométrico anual (PRCPTOT) em torno de 270 mm. Especificamente no sudeste da ALB, observa-se um aumento significativo do CDD, que varia entre 4 a 6 dias/década, enquanto no futuro, esse aumento se estenderá por todo o setor S, em torno de 15 dias ao ano, além da redução do PRCPTOT. Nesse sentido, verifica-se que, no final do século, o clima na ALB como um todo se tornará mais quente, permanecendo as tendências observadas no clima presente, no entanto, o padrão de chuvas é diferente entre as regiões: enquanto no NE e no S, projeta-se um clima mais seco, no NO as projeções indicam um aumento da intensidade das chuvas extremas.

Abstract

This study aims to characterize the behavior of air temperature and precipitation climate extremes in the Brazilian Legal Amazon (BLA) under the present climate and to investigate their projections through the end of the century. The BR-DWGD dataset is used to characterize the present climate, while 12 models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), under the Shared Socioeconomic Pathways scenario SSP5-8.5, are employed to assess future changes relative to the reference period (1995–2014). Statistical tests, including the Mann-Kendall test, are used to assess the significance of observed trends, while the Student's t-test is employed to evaluate the robustness of projected changes. Results show a warming trend in the present climate throughout the BLA, being more pronounced in the Southern (S) and Northeastern (NE) sectors, where the lowest minimum temperatures (TNn) increase by approximately 1 °C per decade in some areas. In the NE, a reduction of 34 cold nights per year is observed per decade. In the future, warming is projected to persist throughout the BLA but at a lower rate in the NE compared to other areas. In the S and Northwestern (NW) sectors, the highest maximum temperatures will increase by an average of 7°C by the end of the century. Regarding precipitation extremes, in the NW, which is currently the wettest portion of the BLA, there is a significant increase in consecutive wet days (CWD) but a reduction of around 60 mm/decade in R95p, possibly indicating better temporal distribution of rain in this part of the BLA. However, for the future, models project the opposite over NW: a reduction in CWD and an increase in R95p values. In the NE, a significant reduction in R95p of around 20 mm/decade is observed. In contrast, by the end of the century, a 30-day increase in the total number of consecutive dry days per year (CDD) is projected, combined with a reduction in annual rainfall (PRCPTOT) of approximately 270 mm. Specifically, in the southeast of the BLA, a significant increase in the CDD is observed, varying between 4 and 6 days per decade. In the future, this increase is expected to extend to the entire S sector, with an additional 15 days per year, combined with a reduction in the PRCPTOT. In this sense, it is observed that, in the future, the climate in the BLA as a whole will become warmer, keeping the trends observed in the present climate. However, the rainfall pattern differs between regions: while in the NE and S, the climate will become drier, in the NW, the intensity of extreme rainfall is expected to increase significantly by the end of the century.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Área da ALB, delimitada pela linha preta grossa, sua topografia (colorido a cada 50 m) e localização do Rio Amazonas (em azul) à esquerda e as três subdivisões da área de estudo à direita: Noroeste (NO), Nordeste (NE) e Sul (S) da ALB, com a localização das estações meteorológicas do INMET 82106 (São Gabriel da Cachoeira/AM), 82098 (Macapá/AP) e 83361 (Cuiabá/MT). Fonte do dado de topografia: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)..... 6

Figura 2.2 Ciclo anual climatológico (1991-2020) da precipitação (mm/mês), e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), para três estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): São Gabriel da Cachoeira (AM), Macapá (AP) e Cuiabá (MT). Os gráficos representam, respectivamente, os setores (a) oeste, (b) norte e (c) sul da ALB. Em (a), não há dados da climatologia da temperatura mínima de dezembro para esta estação. 7

Figura 2.3 Tendências decadais em (a) TXx (°C/década) , (b) TNn (°C/década), (c) TN10p (%dias/década) e (d) TX90p (%dias/década) durante o período 1980–2016 para OBS-BR (retângulo preto; observações em pontos de grade), ERA5 e GMFD. Áreas hachuradas indicam onde as tendências são significativas no nível de confiança de 95%. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020)..... 11

Figura 2.4. Distribuição espacial dos oito indicadores de extremos climáticos de precipitação no Brasil durante 1981-2000: (a) precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) em mm, (b) dias muito úmidos (R95p) em mm, (c) precipitação máxima anual em 1 dia (RX1day) em mm, (d) precipitação máxima anual consecutiva em 5 dias (RX5day) em mm, (e) intensidade diária simples (SDII) em mm/dia, (f) Contagem anual de dias quando a precipitação diária ≥ 20 mm (R20mm) em dias, (g) número de dias secos consecutivos (CDD) em dias e (h) número de dias chuvosos consecutivos (CWD) em dias. Fonte: Medeiros et al. (2022). 12

Figura 2.5 Distribuição espacial das tendências decadais durante 1981–2000 para cada indicador de extremos climático de precipitação em escala anual sobre o Brasil a partir da observação e do conjunto multimodelo do CMIP3, CMIP5 e CMIP6. As regiões hachuradas indicam uma tendência significativa ao nível de 95%. A tendências dos indicadores PRCPTOT, R95p, RX1day, RX5day e SDII estão em mm/década, enquanto os indicadores R20mm, CDD e CWD estão em dias/década. Fonte: Medeiros et al. (2022)..... 13

Figura 2.6 Mudanças futuras dos índices de extremos de temperatura em um conjunto de múltiplos modelos sob os cenários RCP4.5 (a–h) e RCP8.5 (i–p) para o período de 2046–2065 em relação ao período de referência (1986–2005). A mudança futura é computada como a diferença entre a média dos indicadores para o período 2046-2065 e o período de referência. O

pontilhado indica pontos de grade onde mais de 66% dos modelos concordam com o sinal de mudança e mais de 50% dos modelos mostram uma mudança significativa. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020) 16

Figura 2.7 Mudanças futuras dos índices de extremos de precipitação em um conjunto de múltiplos modelos sob os cenários RCP4.5 (a–h) e RCP8.5 (i–p) para o período de 2046–2065 em relação ao período de referência (1986–2005). A mudança futura é computada como a diferença entre a média dos indicadores para o período 2046–2065 e o período de referência. Pontilhado indica pontos de grade onde mais de 66% dos modelos concordaram com o sinal de mudança e mais de 50% dos modelos mostram uma mudança significativa. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020) 18

Figura 3.1 Distância média até a estação meteorológica mais próxima por década (a–f). Série temporal do número total de estações meteorológicas por bacia ao longo do tempo (g) e a série temporal do número total de estações meteorológicas no Brasil (h). Fonte: Xavier et al., 2022.21

Figura 4.1 Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991–2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C computadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961–2019 dos indicadores de extremos de temperatura do ar: (a), (b) e (c) TMAXmean, (d), (e) e (f) TMINmean, e (g), (h) e (i) DTR. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 31

Figura 4.2. Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991–2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961–2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) TXx, e (d), (e) e (f) TXn. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 35

Figura 4.3. Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991–2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961–2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) TNx, e (d), (e) e (f) TNn. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 37

Figura 4.4. Tendências (à esquerda) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961–2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a) e (b) TX90p, (c) e (d) TN90p, (e) e (f) TX10p, e (g) e (h) TN10p. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 39

Figura 4.5. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2019, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) SU35, (d), (e) e (f) WSDI, e (g), (h) e (i) WSFI. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 41

Figura 4.6 Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências em mm/década (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) PRCPTOT, e (d), (e) e (f) R95p. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 43

Figura 4.7. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) RX5day, e (d), (e) e (f) SDII. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 45

Figura 4.8. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) R30mm, (d), (e) e (f) CDD, e (g), (h) e (i) CWD. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 47

Figura 4.9. Resumo do comportamento das tendências dos extremos de temperatura do ar e de precipitação identificadas nas últimas décadas. Os tamanhos dos símbolos (pequeno, médio e grande) e sua localização no mapa são usados para destacar respectivamente a magnitude relativa entre as três regiões (NO, NE e S) e o local predominante onde essa tendência foi detectada dentro de cada região. As setas para cima (baixo) indicam aumento (redução) da tendência observada..... 52

Figura 4.10 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TMAXmean (°C) , (c) e (d) TMINmean (°C), e (e) e (f) DTR (°C). Áreas não hachuradas indicam mudanças robustas (mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% e onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança). Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa. Linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 53

Figura 4.11 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TXx, e (c) e (d) TXn, sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 56

Figura 4.12 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TNx (°C), e (c) e (d) TNn (°C). Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 58

Figura 4.13 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) SU35 (dias/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 59

Figura 4.14 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) PRCPTOT (mm/ano), e (c) e (d) R95p (mm/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 61

Figura 4.15 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) RX5day (mm/ano), e (c) e (d) SDII (mm/dia/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à

esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 63

Figura 4.16 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) R30mm (dia/ano), (c) e (d) CDD (dia/ano), e (e) e (f) CWD (dia/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos..... 65

Figura 4.17 Resumo do comportamento das mudanças mais relevantes projetadas nos indicadores de extremos de temperatura do ar e de precipitação no final do século. Os tamanhos dos símbolos (pequeno, médio e grande) e sua localização no mapa são usados para destacar respectivamente a magnitude relativa entre as três regiões (NO, NE e S) e o local predominante onde essa mudança é projetada dentro de cada região. As setas para cima (baixo) indicam aumento (redução) da mudança projetada. 69

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Informações sobre os modelos CMIP6 utilizados neste estudo..... 23

Tabela 4.1 Magnitudes das tendências dos indicadores de extremos de temperatura do ar no período 1961-2019, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Valores em negrito denotam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 31

Tabela 4.2 Magnitudes das tendências dos indicadores de extremos climáticos associados à precipitação no período 1961-2021, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Valores em negrito denotam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%..... 43

Tabela 4.3 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TMAXmean, TMINmean e DTR, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Os valores médios dos indicadores no clima futuro sob cenário SSP5-8.5 correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 54

Tabela 4.4 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TXx (°C) e TXn (°C) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 56

Tabela 4.5 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TNx (°C) e TNn (°C) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 58

Tabela 4.6 Clima presente e futuro do indicador de extremos climáticos SU35 (dias/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 59

Tabela 4.7 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos PRCPTOT (mm/ano) e R95p (mm/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre

parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 62

Tabela 4.8 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos RX5day (mm/ano) e SDII (mm/dia/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 64

Tabela 4.9 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos R30mm (dia/ano), CDD (dia/ano) e CWD (dia/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo..... 66

Lista de Siglas

Af – Equatorial chuvoso

ALB – Amazônia Legal Brasileira

Am – Tropical de monção

AMZ – Amazônia

ANA – Agência Nacional de Águas

Aw – Tropical seco e úmido

BR-DWGD – *Brazillian Daily Weather Gridded Data*

CCI – Comissão de Climatologia

CMIP – *Coupled Model Intercomparison Project*

DECK – *Diagnostic, Evaluation and Characterisation of Klima*

ERA5 – *European Centre for Medium-Range Weather Forecast Reanalysis 5*

ETCCDI – *Expert Team on Climate Change Detection and Indices*

GMFD – Global Meteorological Forcing Dataset

GEEs – Gases de Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW – *Inverse Distance Weighted*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – *Intergovernmental Panel of Climate Change*

MIPs – *Endorsed Model Intercomparison Projects*

OMM – Organização Meteorológica Mundial

SMAS – Sistema de Monção da América do Sul

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	Introdução	2
1.1	<i>Objetivos do Trabalho</i>	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	<i>Climatologia da Amazônia Brasileira</i>	5
2.2	<i>Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente.....</i>	9
2.3	<i>Projeções de Mudanças Climáticas.....</i>	15
3	Dados e Metodologia	19
3.1	<i>Dados Observacionais.....</i>	19
3.2	<i>Modelos CMIP6.....</i>	22
3.3	<i>Indicadores de Extremos Climáticos</i>	25
3.4	<i>Testes Estatísticos</i>	27
3.4.1	<i>Teste de Mann-Kendall</i>	27
3.4.2	<i>Teste da Curvatura de Sen</i>	28
3.4.3	<i>Teste t de Student</i>	29
4	Resultados	30
4.1	<i>Climatologia e Tendências dos Extremos Climáticos Observados sobre a ALB.....</i>	30
4.1.1	<i>Indicadores de Temperatura</i>	30
4.1.2	<i>Indicadores de Precipitação.....</i>	42
4.1.3	<i>Síntese da Climatologia e Tendências dos Extremos Climáticos</i>	48
4.2	<i>Projeções dos Extremos Climáticos sobre a ALB</i>	52
4.2.1	<i>Indicadores de Temperatura</i>	52
4.2.2	<i>Indicadores de Precipitação.....</i>	60
4.2.3	<i>Síntese das Projeções Futuras dos Extremos Climáticos</i>	67
5	Conclusões	69
6	Referências	74

1 Introdução

A Amazônia (AMZ) desempenha um papel climático importante em todo o planeta através do fornecimento de calor e vapor d'água para a atmosfera (MALHI et al., 2008; NOBRE et al., 2009). Essa região abrange toda a floresta amazônica, que abriga cerca de 15% da biodiversidade global, sendo assim a região mais rica da Terra biologicamente, contribuindo para o funcionamento biogeoquímico do sistema terrestre (HUBBELL et al. 2008; MARENKO & SPINOZA, 2016). Dada a sua importância, diversos estudos vêm investigando a relação entre as mudanças climáticas regionais e o desmatamento na AMZ (GUIMBERTEAU et al. 2017; OLIVEIRA et al. 2021). Há evidências de que uma redução local das chuvas e um aumento da temperatura do ar ocorrem devido ao desmatamento da floresta e também que as mudanças climáticas projetadas poderão substituir a floresta tropical da AMZ por pastagem natural (LYRA et al. 2016), embora as conclusões de tais estudos dependam de uma série de processos parametrizados, como os esquemas de convecção e microfísica das nuvens em modelos climáticos acoplados (NOBRE et al. 2009). Assim, a degradação da floresta pode deixar um legado negativo duradouro para a biodiversidade local decorrente da interação atmosfera-biosfera (MALHI et al., 2009).

Alguns estudos verificaram que as tendências observadas na precipitação são bastante heterogêneas na AMZ. Nas últimas décadas, nota-se um aumento na intensidade das chuvas no norte e uma redução no setor sul da região (GLOOR et al., 2013; BARICHIVICH et al., 2018; GARCIA et al., 2018; ESPINOZA et al., 2024). Essa redução das chuvas no setor sul da AMZ vem acompanhada de uma tendência de aumento na frequência de dias secos por ano, sendo este aumento maior no início da estação chuvosa (ESPINOZA et al., 2019). Em relação à temperatura, um aumento é verificado em toda a extensão da AMZ, seguindo uma tendência de $+0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (MALHI & WRIGHT 2004; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Sabe-se que o modo mais importante de variabilidade climática interanual no globo, o fenômeno El Niño – Oscilação Sul, tem um efeito marcante na variabilidade espacial e temporal da precipitação na Amazônia (MARENKO et al., 2018; BARBOSA et al., 2021). Essas tendências podem interagir sinergicamente com a variabilidade das anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM), gerando eventos de precipitação intensa e seca ainda mais frequentes e intensos

impulsionados pelo desflorestamento (BRANDO et al. 2010). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), secas mais frequentes e severas nas próximas décadas podem acometer grandes áreas da AMZ e outras formações florestais tropicais em função do acúmulo de gases que retêm calor na atmosfera.

A fim de verificar se essas tendências sobre a AMZ se propagarão no futuro, alguns estudos investigam as mudanças nos padrões de temperatura e precipitação através do uso de modelos climáticos globais (KHARIN et al., 2013; ZHU et al., 2018; ALMAZROUI et al., 2020, 2021; entre outros). Contudo, ressalta-se que a Amazônia das próximas décadas pode ser ainda mais vulnerável do que os modelos climáticos supõem, uma vez que a mudança na cobertura e uso da terra tem consequências ecológicas negativas (PERZ et al., 2008). Desde 1995, o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP) tem organizado experimentos de modelos climáticos envolvendo grupos de modelagem climática internacional. Isso tem levado a um melhor entendimento do clima passado, presente e futuro. Os experimentos do CMIP têm sido a base para os relatórios de avaliação do IPCC. Estudos com modelos utilizando gerações anteriores do CMIP, como o CMIP3 e CMIP5, projetam um prolongamento da estação seca na Amazônia (COOK et al., 2012; JOETZJER et al., 2013), além de apontarem para um clima mais seco (úmido) no setor leste (oeste) no final do século, afetando a intensidade e a extensão das inundações e secas no Rio Amazonas (DAVIDSON et al., 2012; SORRIBAS et al., 2016).

Atualmente, o projeto CMIP se encontra em sua Sexta Fase (The Sixth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project – CMIP6; O’NEILL et al., 2016), tendo sido utilizado no sexto relatório de avaliação do IPCC (2021). Os estudos de Dias e Reboita (2021), Ortega et al. (2021b) e Arias et al. (2021) destacam as melhorias dos modelos numéricos que integram o CMIP6 em relação à versão anterior (CMIP5; TAYLOR et al., 2012), como a representação da precipitação na região tropical da América do Sul. Esses modelos são uma importante ferramenta para investigar as mudanças futuras que poderão ocorrer nos extremos climáticos. Alguns trabalhos que abrangem a AMZ identificaram mudanças significativas nos padrões de chuva e temperatura na região, especialmente para o final do século XXI (VOGEL et al., 2020; ORTEGA et al., 2021; ALMAZROUI et al., 2021; COLLAZO et al., 2022; FERREIRA et al., 2023, entre outros). No que se refere aos extremos de temperatura, projeta-se um aumento significativo nos extremos quentes e de redução nos extremos frios no setor sul da AMZ (AVILA-DIAZ et al.,

2020b). Já em relação a precipitação, espera-se uma redução no leste da AMZ e um aumento nos períodos secos no sul e leste da região (BOISIER et al., 2015; LONGO et al., 2018; AVILA-DIAZ et al. 2020b; REBOITA et al., 2022).

Aproximadamente 60% da AMZ se localiza no Brasil e ocupa em média 49% do território nacional (IBGE, 2022), apesar disso, há poucos estudos com foco nas projeções de extremos climáticos na Amazônia Legal Brasileira (ALB), o que reduz o nível de detalhamento da pesquisa. A considerar a extensão territorial da ALB, é importante refinar esse tipo de análise, respeitando as diferenças climáticas em cada um de seus setores. Além disso, a maior parte dos trabalhos publicados carece de estudos acerca da climatologia dos extremos climáticos, tornando a análise e a caracterização do clima presente na ALB incompleta. Esse nível de detalhamento é importante, uma vez que as modificações do clima presente podem provocar alterações nos extremos sem afetar os campos médios. O mesmo acontece em estudos atrelados as projeções, que se concentram nas mudanças dos campos médios de temperatura e precipitação, sem incluir a projeção dos extremos climáticos. Para pesquisas sobre impactos locais e regionais, é fundamental que tais modificações ao longo dos anos sejam disponibilizadas em detalhes para cada região da área de estudo.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é investigar as projeções de mudanças climáticas na região da ALB a médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazos utilizando o cenário Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways SSP5-8.5*; RIAHI et al., 2017), através de indicadores de extremos climáticos de temperatura do ar e precipitação, gerados por modelos numéricos participantes do CMIP6. Ademais, delineiam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Elaborar uma análise detalhada do clima presente da ALB através da climatologia dos indicadores de extremos climáticos de temperatura do ar e precipitação;
2. Identificar as tendências dos indicadores de extremos climáticos no clima presente sobre a ALB e suas sub-regiões e

3. Identificar as possíveis mudanças nos extremos climáticos na ALB considerando a concordância entre os modelos pré-selecionados e a significância estatística do sinal da mudança.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura sobre a climatologia da precipitação e da temperatura do ar, e também sobre a detecção e projeção da mudança climática sobre a ALB.

2.1 Climatologia da Amazônia Brasileira

A ALB, é uma definição política atribuída pelo governo brasileiro a área da floresta Amazônica pertencente ao Brasil (IBGE, 2022). Ela é composta por nove estados brasileiros: Acre (AC), Amapá (AP), Amazonas (AM), Mato Grosso (MT), Pará (PA), Tocantins (TO), Rondônia (RO), Roraima (RR), e parte do estado do Maranhão (MA), ou seja, a oeste do meridiano 44°W como mostra a Figura 2.1. A região da ALB inclui as bacias hidrográficas dos rios Tocantins-Araguaia e Amazonas e abarca três biomas diferentes (AMZ, Cerrado e Pantanal). A bacia do Rio Amazonas possui importantes empreendimentos hidrelétricos, como Belo Monte, Tucuruí, Jirau e Santo Antônio, que juntas somam mais de 26 mil MW de capacidade de produção, o que ilustra a importância da região economicamente. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a ALB ocupa uma área de aproximadamente 5 milhões de quilômetros quadrados, respondendo por aproximadamente 70% da extensão espacial total das florestas tropicais do mundo.

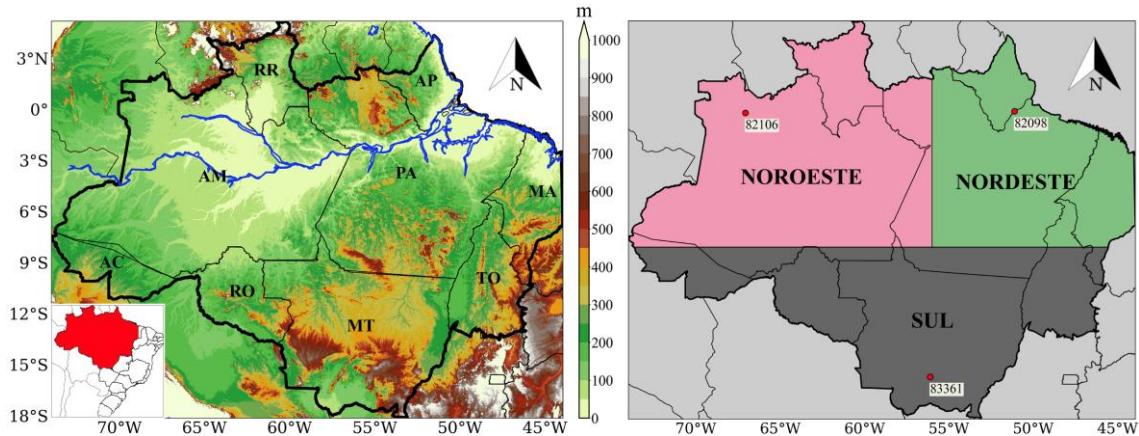


Figura 2.1. Área da ALB, delimitada pela linha preta grossa, sua topografia (colorido a cada 50 m) e localização do Rio Amazonas (em azul) à esquerda e as três subdivisões da área de estudo à direita: Noroeste (NO), Nordeste (NE) e Sul (S) da ALB, com a localização das estações meteorológicas do INMET 82106 (São Gabriel da Cachoeira/AM), 82098 (Macapá/AP) e 83361 (Cuiabá/MT). Fonte do dado de topografia: *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)

A ALB apresenta um clima predominantemente equatorial (ou tropical úmido), com significativos acumulados pluviométricos anuais e ausência ou curto período seco, além de temperaturas elevadas durante todo o ano (ALVARES et al., 2013). Os volumes anuais de chuva variam de 2000 a 3000 mm (LUIZ-SILVA et al., 2021), e o período de inundações costuma acontecer entre os meses de dezembro e maio na bacia do rio Amazonas (LATRUBESSE et al., 2017). Dentro da classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), o clima equatorial pode ser separado em três categorias distintas: equatorial chuvoso (Af), tropical de monção (Am) e tropical seco e úmido (Aw).

O setor oeste da ALB corresponde ao clima equatorial chuvoso, caracterizado por uma precipitação anual superior a 2000 mm/ano e um período de estiagem breve ou inexistente (FIGUEROA e NOBRE, 1990). Essa característica do clima Af pode ser observada na Figura 2.2a, que mostra o ciclo anual das temperaturas máxima e mínima e da precipitação da estação São Gabriel da Cachoeira, localizada no oeste da ALB. Nessa estação meteorológica os acumulados mensais são superiores a 150 mm o ano todo. A alta precipitação nessa área, próxima à Cordilheira dos Andes, é atribuída à ascensão orográfica da umidade transportada pelos ventos alísios de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT; NOBRE, 1983; TOMASELLA et al., 2013). Na região costeira, do PA ao AP, a precipitação também é elevada e sem período de seca definido, devido à influência das linhas de instabilidade formadas ao longo da costa durante as tardes, impulsionadas pela brisa marítima (COEHN et al., 1989).

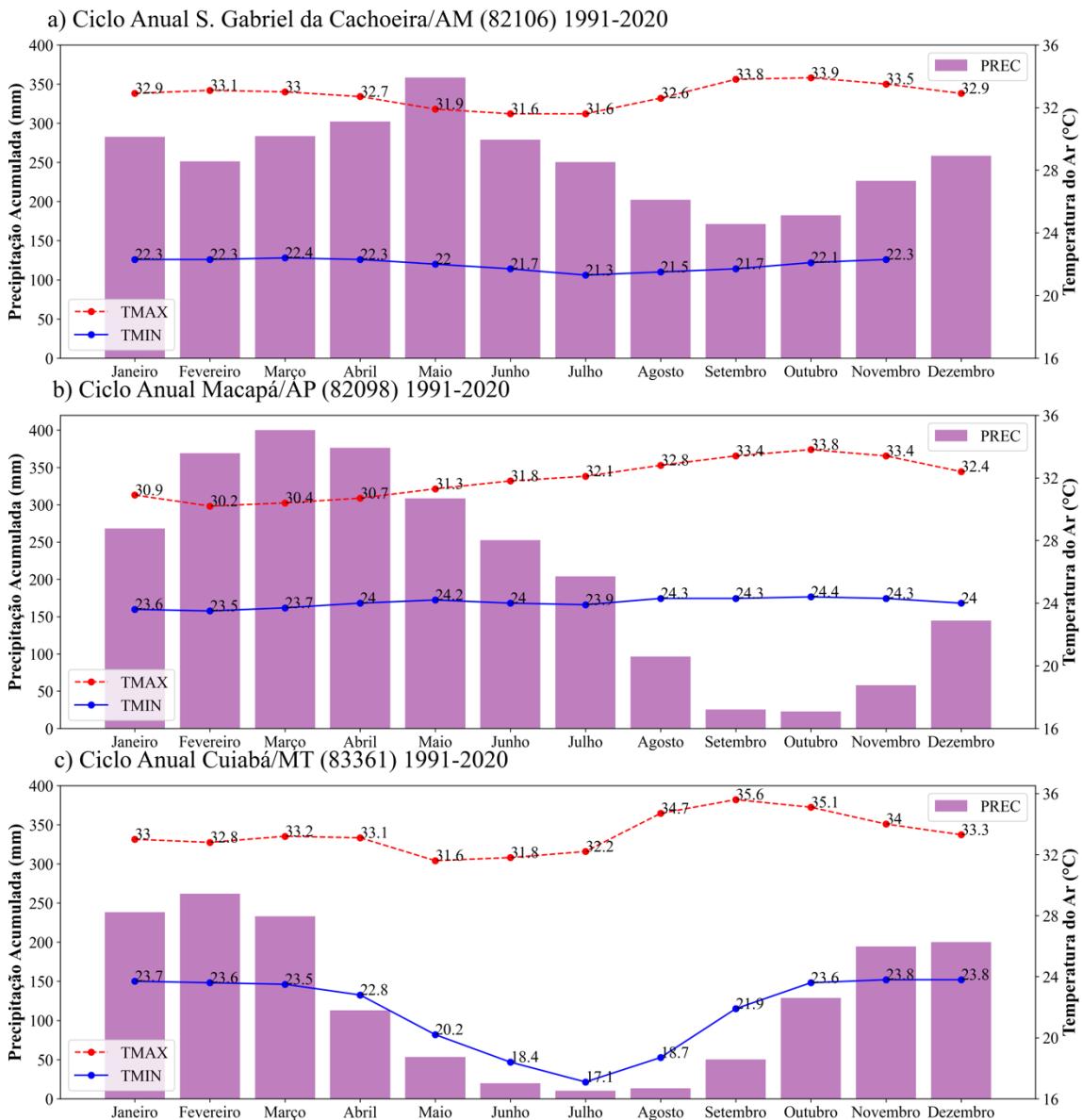


Figura 2.2 Ciclo anual climatológico (1991-2020) da precipitação (mm/mês), e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), para três estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): São Gabriel da Cachoeira (AM), Macapá (AP) e Cuiabá (MT). Os gráficos representam, respectivamente, os setores (a) oeste, (b) norte e (c) sul da ALB. Em (a), não há dados da climatologia da temperatura mínima de dezembro para esta estação.

A porção central e norte da ALB se enquadra no clima tropical de monção (Am), apresentando totais pluviométricos anuais elevados, mas com um período de estiagem bem definido de agosto a outubro (acumulados mensais inferiores a 50 mm), influenciado pelo domínio do ramo descendente da Célula de Hadley (HOREL et al., 1989). Esse período de estiagem bem demarcado pode ser identificado no ciclo anual da estação Macapá (Figura 2.2b) localizada ao norte da ALB, onde os acumulados mensais ultrapassam os 300 mm de fevereiro a maio (por influência da ZCIT e linhas de instabilidade costeiras), e são inferiores a 50 mm em setembro e outubro. A máxima

pluviosidade na região central da AMZ pode estar associada à penetração de sistemas frontais do sul, interagindo com a convecção local (GARREAUD e WALLACE, 1998).

Por fim, os setores leste e sul da ALB se caracterizam pelo clima tropical de monção (Am) e, tropical seco e úmido (Aw), onde as estações seca e chuvosa são bem distintas (DUBREUIL et al., 2018). Tais categorias de clima podem ser apreciadas através do ciclo anual das temperaturas máxima e mínima e da precipitação na estação meteorológica de Cuiabá (MT), apresentados na Figura 2.2c. No sul da ALB, o máximo de precipitação ocorre no verão austral e os acumulados diários são da ordem de 10 mm/dia, em média, chegando a mais de 30 mm/dia em episódios de chuvas intensas (NOBRE et al., 2009).

No geral, a temperatura do ar na ALB apresenta pouca variação ao longo do ano, devido aos elevados níveis de radiação solar incidente típicos da região equatorial do globo (FISCH, 1998; NOBRE et al., 2009). Durante a estação chuvosa (novembro a abril), a temperatura máxima do ar é menor devido ao predomínio da nebulosidade, que reduz a radiação solar incidente (ROBERTSON; MECHOSO, 2000). Nas regiões central e norte da ALB, a amplitude térmica sazonal é pequena, variando entre 1 e 2°C, com temperaturas médias do ar entre 24 e 26°C (WILLIAMS e SÁTORI, 2004). Já na porção sul, que inclui os estados de MT, AC e RO, a influência de sistemas frontais entre junho e outubro pode resultar em friagens, reduzindo drasticamente as temperaturas máximas e mínimas. Durante esses eventos, as temperaturas mínimas podem atingir 8°C (FISCH, 1992; MARENKO et al. 1997). Outra característica desses eventos é o aumento da pressão causado pela entrada do anticiclone migratório deslocando-se das latitudes altas para a região tropical (RICARTE et al., 2015).

Santos et al. (2015) sugerem que uma subdivisão da ALB em três regiões seria suficiente para caracterizar seus distintos padrões de precipitação. Uma região no norte da ALB, subdividida em duas áreas (zona noroeste e zona costeira do Amazonas) e o sul da ALB. A zona costeira tem máxima precipitação na primeira metade do ano e um período seco na segunda metade. O noroeste do Amazonas apresenta máxima precipitação no inverno austral e uma redução no verão austral, mas não exibe uma estação seca bem definida. Finalmente o sul da ALB exibe um máximo (mínimo) de precipitação no verão (inverno). Assim, considerando a metodologia de Santos et al. (2015), neste trabalho

utiliza-se a subdivisão da ALB nas áreas Noroeste (NO), Nordeste (NE) e Sul (S), como apresentado na Figura 2.1.

2.2 Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente

As mudanças climáticas já são uma realidade em várias regiões do mundo, manifestando-se no aumento da temperatura média global, na elevação do nível médio dos oceanos e em outros parâmetros que diferem dos registrados na última metade do século passado. A detecção dessas mudanças climáticas ocorre mediante a análise dos dados observados ao longo dos anos, permitindo identificar alterações na série temporal de uma determinada variável.

Desde a década de 1980, a temperatura média global tem aumentado em média 0,2°C por década, representando um ritmo de aumento três vezes superior ao registrado desde 1850 (IPCC, 2023). Além disso, os últimos dez anos foram os mais quentes da história global, compreendendo o período de 2015 a 2024 (NOAA, 2025).

Na América do Sul, estudos recentes indicam alterações nos padrões de temperatura e precipitação (LANGERWISCH et al., 2013; SKANSI et al., 2013; PABÓN-CAICEDO et al., 2020; DERECZYNSKI et al., 2020; REGOTO et al., 2021). Além disso, diversas pesquisas apontam para um aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas e secas prolongadas (LEMES; REBOITA; TORRES, 2020; BITENCOURT et al., 2020; ZUBIETA et al., 2021; SANTOS et al., 2024).

Até o momento, o ano de 2023 foi o mais quente já registrado na AMZ, ultrapassando o recorde de 2015 (ESPINOZA et al., 2024). Outros estudos constataram que as duas últimas décadas foram as mais quentes já registradas na região. Jiménez-Muñoz et al. (2016) identificaram um aumento de 0,5°C na temperatura média do ar desde a década de 1980, enquanto pesquisas posteriores indicaram um aquecimento superior a 0,6°C, sendo o sudeste da ALB a área mais impactada (ALMEIDA et al., 2017; MARENGO et al., 2018; LUIZ-SILVA et al., 2022). Esse aumento mais acentuado da temperatura pode ter sido influenciado pela incidência de eventos El Niño mais intensos, uma vez que os anos de 1998, 2015 e 2023 se destacam como os mais quentes registrados na AMZ. Contudo, a contínua interação entre a atmosfera e a biosfera local faz com que

o desmatamento da AMZ também impacte o clima regional, aumentando a frequência de eventos extremos de calor (NOBRE et al., 2016).

Em relação aos extremos climáticos, Silva et al. (2019) observaram que o setor mais oeste da ALB se destaca pela tendência de aumento da magnitude dos extremos de temperatura do ar, maior temperatura máxima anual (TXx) e maior (TNx) e menor (TNn) temperatura mínima anual, enquanto na porção leste, nota-se um aumento significativo da frequência de ocorrência dos dias (TX90p) e noites (TN90p) quentes. Esse aumento significativo do indicador TN90p também foi detectado por Terassi et al. (2024), utilizando as estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponíveis na região da ALB. Os autores também verificaram um aumento significativo de TMAXmean e TMINmean, além de uma tendência significativa de redução das noites frias (TN10p). Os resultados sugerem que o desmatamento e as mudanças no uso da terra, particularmente nos estados do MT, TO, MA e PA (LEVY et al., 2018) são os principais causadores das tendências climáticas observadas.

Na Figura 2.3 apresenta-se os resultados de tendência de extremos de temperatura do ar, obtidos por Avila-Diaz et al. (2020), utilizando dados de Xavier et al. (2016; OBS-BR), a reanálise *European Centre for Medium-Range Weather Forecast Reanalysis v.5* (ERA5) e o *Global Meteorological Forcing Dataset* (GMFD). Esses pesquisadores destacam que todos os indicadores de extremos de temperatura apresentam uma tendência de aquecimento na ALB em todas as bases de dados utilizadas, exceto o GMFD, que aponta uma tendência de redução em TXx (Figura 2.3a) no noroeste e sudeste da região. No caso das noites mais frias no ano (TNn; Figura 2.3 b), as três bases de dados utilizadas pelos pesquisadores apontaram para um aquecimento no sudoeste e sul da ALB. Além disso, eles demonstraram que a frequência de ocorrência das noites quentes (TN90p) apresenta uma tendência de aumento mais pronunciada no noroeste da região e as ocorrências de noites frias (TN10p) apresentam uma tendência significativa de redução na porção central e leste da ALB (Figura 2.3c). A duração das ondas de calor (WSDI) também apresenta um aumento consistente e mais acentuado na porção noroeste da ALB (AVILA-DIAZ et al., 2020).

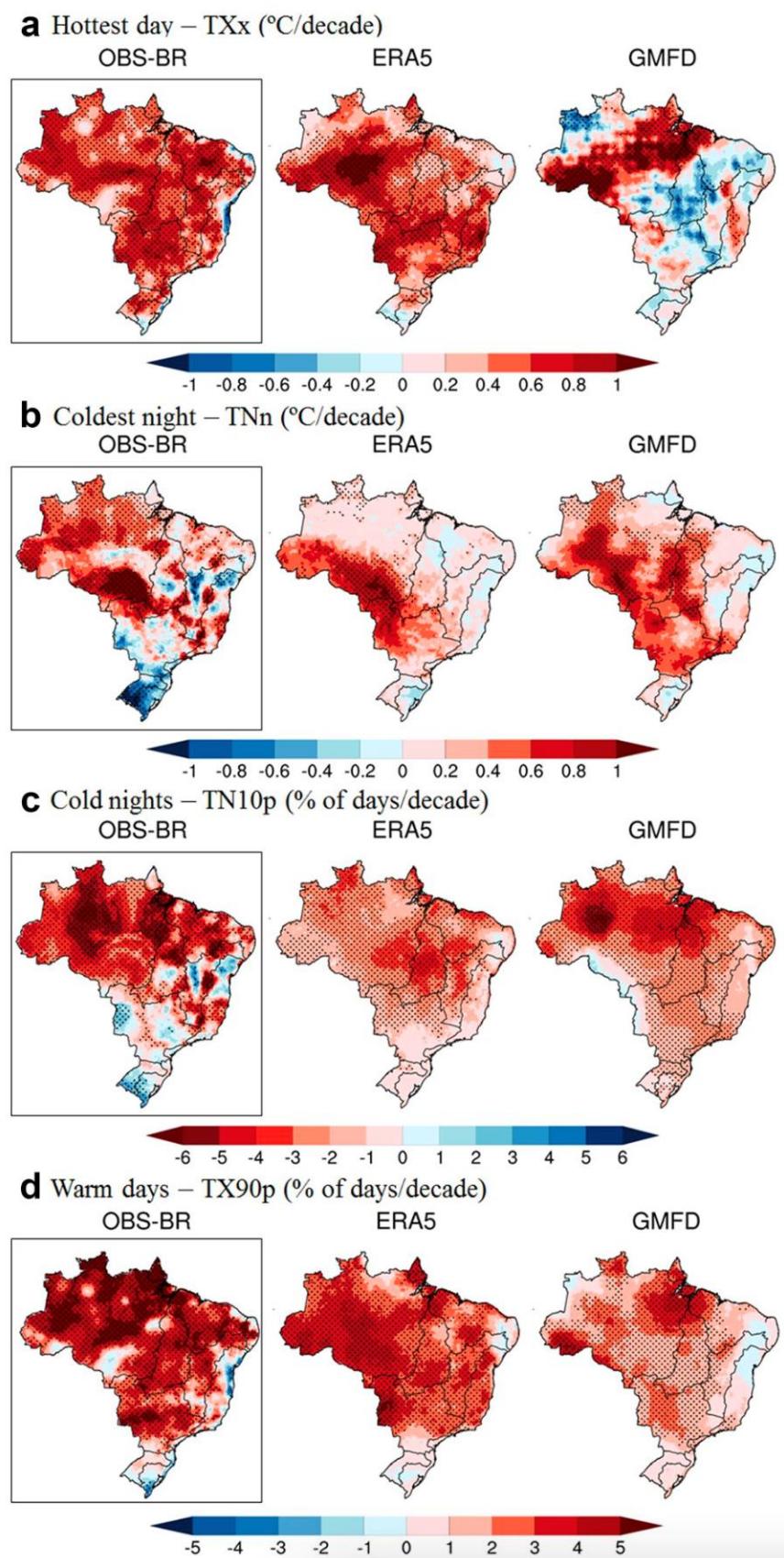


Figura 2.3 Tendências decadas em (a) TXx (°C/década), (b) TNn (°C/década), (c) TN10p (%dias/década) e (d) TX90p (%dias/década) durante o período 1980–2016 para OBS-BR (retângulo preto; observações em pontos de grade), ERA5 e GMFD. Áreas hachuradas indicam onde as tendências são significativas no nível de confiança de 95%. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020).

Em relação à precipitação, os estudos não apontam uma tendência unidirecional dentro da ALB. Gloor et al. (2013) observaram uma tendência de aumento na precipitação na porção noroeste, enquanto Alves (2016) constatou o oposto na porção sul durante a estação chuvosa.

Medeiros et al. (2022) apresentam uma climatologia (1981-2000) dos indicadores de extremos climáticos sobre o Brasil (Figura 2.4) e também de suas tendências no mesmo período (Figura 2.5), utilizando dados de Xavier et al. (2016). Os autores mostram que os maiores totais pluviométricos anuais (PRCPTOT) do Brasil são observados na porção noroeste da ALB, além do extremo norte (Figura 2.4a). Na análise das tendências dos extremos de precipitação (Figura 2.5) os autores destacam a tendência de um clima mais úmido na porção nordeste e mais seco na porção sudeste da Região Norte do Brasil.

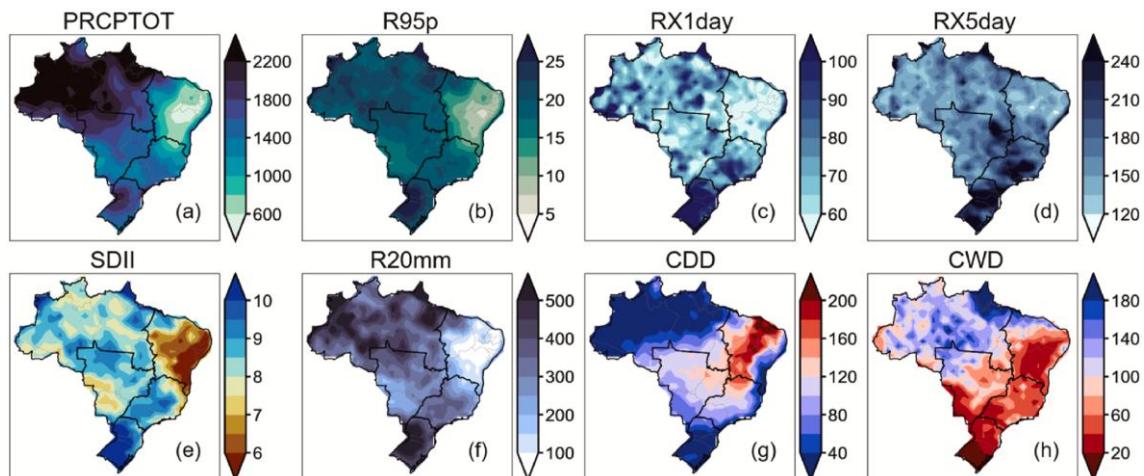


Figura 2.4. Distribuição espacial dos oito indicadores de extremos climáticos de precipitação no Brasil durante 1981-2000: (a) precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) em mm, (b) dias muito úmidos (R95p) em mm, (c) precipitação máxima anual em 1 dia (RX1day) em mm, (d) precipitação máxima anual consecutiva em 5 dias (RX5day) em mm, (e) intensidade diária simples (SDII) em mm/dia, (f) Contagem anual de dias quando a precipitação diária ≥ 20 mm (R20mm) em dias, (g) número de dias secos consecutivos (CDD) em dias e (h) número de dias chuvosos consecutivos (CWD) em dias. Fonte: Medeiros et al. (2022).

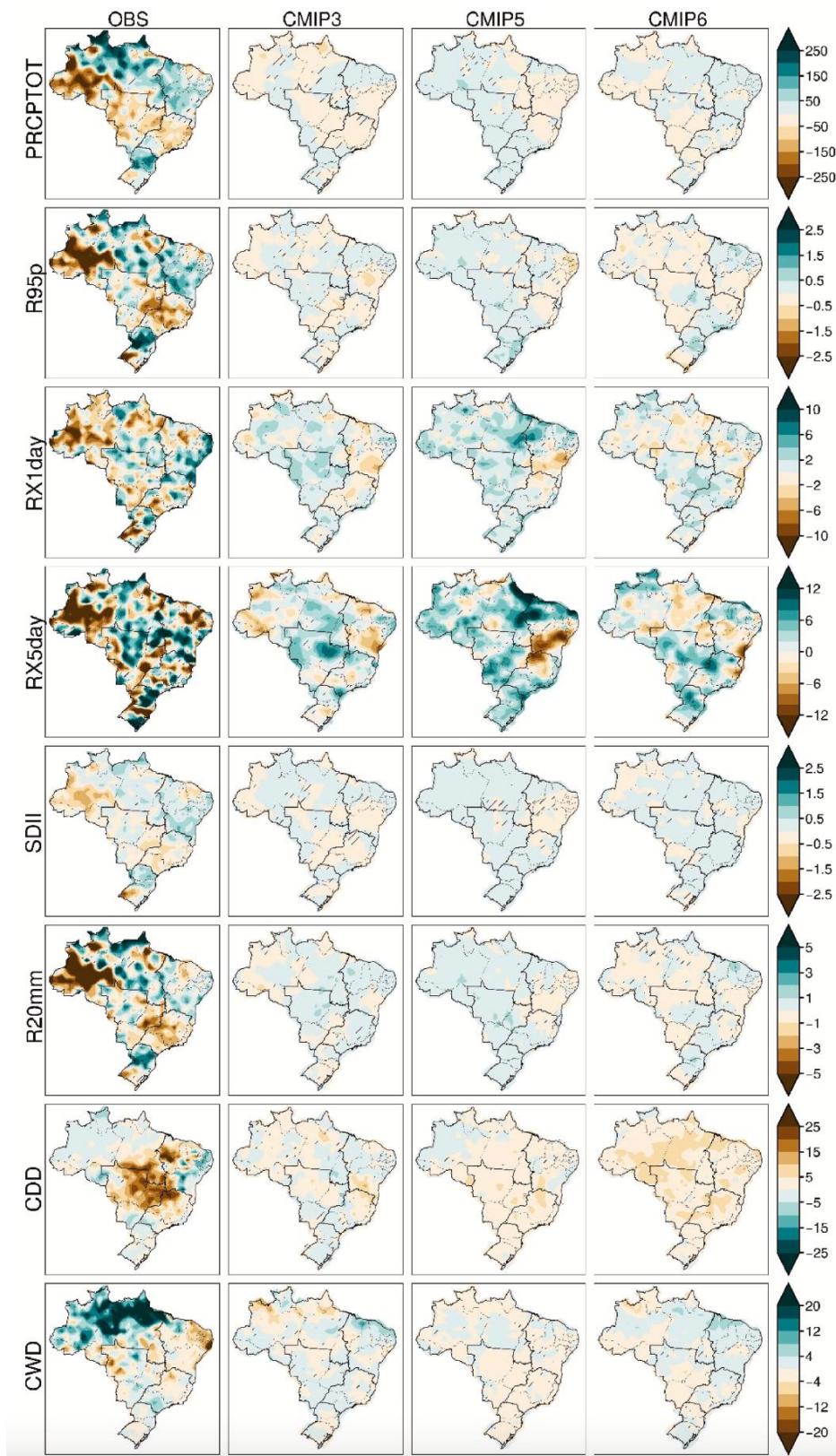


Figura 2.5 Distribuição espacial das tendências decadais durante 1981–2000 para cada indicador de extremos climático de precipitação em escala anual sobre o Brasil a partir da observação e do conjunto multimodelo do CMIP3, CMIP5 e CMIP6. As regiões hachuradas indicam uma tendência significativa ao nível de 95%. A tendências dos indicadores PRCPTOT, R95p, RX1day, RX5day e SDII estão em mm/década, enquanto os indicadores R20mm, CDD e CWD estão em dias/década. Fonte: Medeiros et al. (2022).

Outros estudos identificaram um prolongamento do período seco desde 1979 sobre o sudeste da ALB (FU et al., 2013; DEBORTOLI et al., 2015; MARENKO & ESPINOZA et al., 2016). Almeida et al. (2017) analisaram o comportamento da precipitação na ALB desde 1973 a 2013 utilizando dados de superfície e constataram uma redução significativa da chuva anual no setor leste da região. Além disso, os autores verificaram que essa redução é maior no período seco comparado ao período chuvoso.

Acerca dos extremos de precipitação, Silva et al. (2019) verificaram um aumento do maior acumulado de chuva em 5 dias consecutivos (RX5day), do total pluviométrico acumulado durante os dias com chuva intensa (R95p) e durante os dias com chuva muito intensa (R99p) na porção leste da ALB e um aumento também dos dias secos consecutivos (CDD). No trabalho de Terassi et al. (2024), das 15 estações meteorológicas analisadas, apenas 3 apresentaram uma tendência estatisticamente significativa de aumento dos indicadores RX5day e R95p, na porção leste. No setor norte, no entanto, 8 das 15 estações nesse setor apresentam uma tendência de aumento estatisticamente significativo do indicador RX5day.

Espinoza et al. (2019) detectaram aumento do CDD no sul da bacia Amazônica, além de uma redução significativa da precipitação nas porções central e noroeste. O mesmo sinal é encontrado no trabalho de Medeiros et al. (2022), como é possível verificar na Figura 2.5. No trabalho de Terassi et al. (2024), os autores mostraram que todas as estações meteorológicas utilizadas dentro da ALB apontam para um aumento (redução) dos dias secos (úmidos) consecutivos, sobretudo em locais onde a atividade agrícola provocou a remoção da cobertura vegetal original, como a porção sudeste da Amazônia, que pertence ao arco do desmatamento (LEVY et al., 2018). Além disso, os anos 1980 e 1990 se destacam com ruptura nas séries temporais, onde os dias secos consecutivos começam a aumentar de modo acentuado.

Outros estudos verificaram uma tendência de aumento dos eventos de seca sobre a AMZ (SOLMAN et al., 2021; MEDEIROS et al., 2022; AVILA-DIAZ et al., 2023). Costa et al. (2022) constataram que as maiores ondas de calor na região ocorreram durante períodos de seca, com anomalias negativas de umidade relativa e evapotranspiração, especialmente no sudeste da ALB. Essa redução nos totais pluviométricos e o prolongamento da estação seca afeta diretamente o fornecimento de água para a população e contribui para o aumento do risco de incêndios florestais (ARAGÃO et al.

2007), além de impactar a geração hidrelétrica, uma vez que a ALB abriga várias usinas importantes para a produção de eletricidade no Brasil.

2.3 Projeções de Mudanças Climáticas

O Sexto Relatório de Avaliação (Sixth Assessment Report - AR6) do IPCC (IPCC 2021) confirma que o uso insustentável do solo e a queima de combustíveis fósseis elevaram a temperatura global em 1,1°C em 2011-2020, acima dos níveis pré-industriais (1850-1900). Projeções indicam que esse aquecimento continuará até o final do século XXI, resultando em mudanças nos extremos climáticos de temperatura e precipitação. Embora a precipitação global aumente, os padrões regionais são complexos, com áreas de aumento e redução relacionadas a mudanças na circulação global, balanços de energia e influências locais (THACKERAY et al., 2018; GIORGI et al., 2019). Na América do Sul, projeta-se um aquecimento em todo o continente. Chou et al. (2014) analisaram cenários projetados pelo modelo regional Eta, aninhado a dois modelos globais (MIROC5 e HadGEM2-ES), e observaram que o aquecimento começa na porção central e sudeste do Brasil, estendendo-se até o norte do continente.

As mudanças de temperatura são robustas tanto em termos de sinal como de magnitude. O estudo de Almazroui et al. (2021) analisou as mudanças nas projeções de temperatura sobre a América do Sul e verificou que o aquecimento mais forte em todos os cenários futuros ocorre na AMZ. Avila-Diaz et al. (2020) constataram que as projeções mais significativas de aumento nos extremos quentes e de redução nos extremos frios ocorrerão no setor sul da ALB (Figura 2.6). Especificamente, projeta-se um aumento superior a 64% das noites quentes (TN90p) no noroeste da ALB e um aumento similar dos dias quentes (TX90p) na porção central e oeste da ALB (AVILA-DIAZ et al., 2020). Em um estudo mais recente, Oliveira et al. (2021), sugerem que devido aos efeitos combinados da savanização e das mudanças climáticas, o índice de estresse térmico poderá exceder o limite de adaptação humana até 2100, sendo esse impacto maior no setor norte da AMZ.

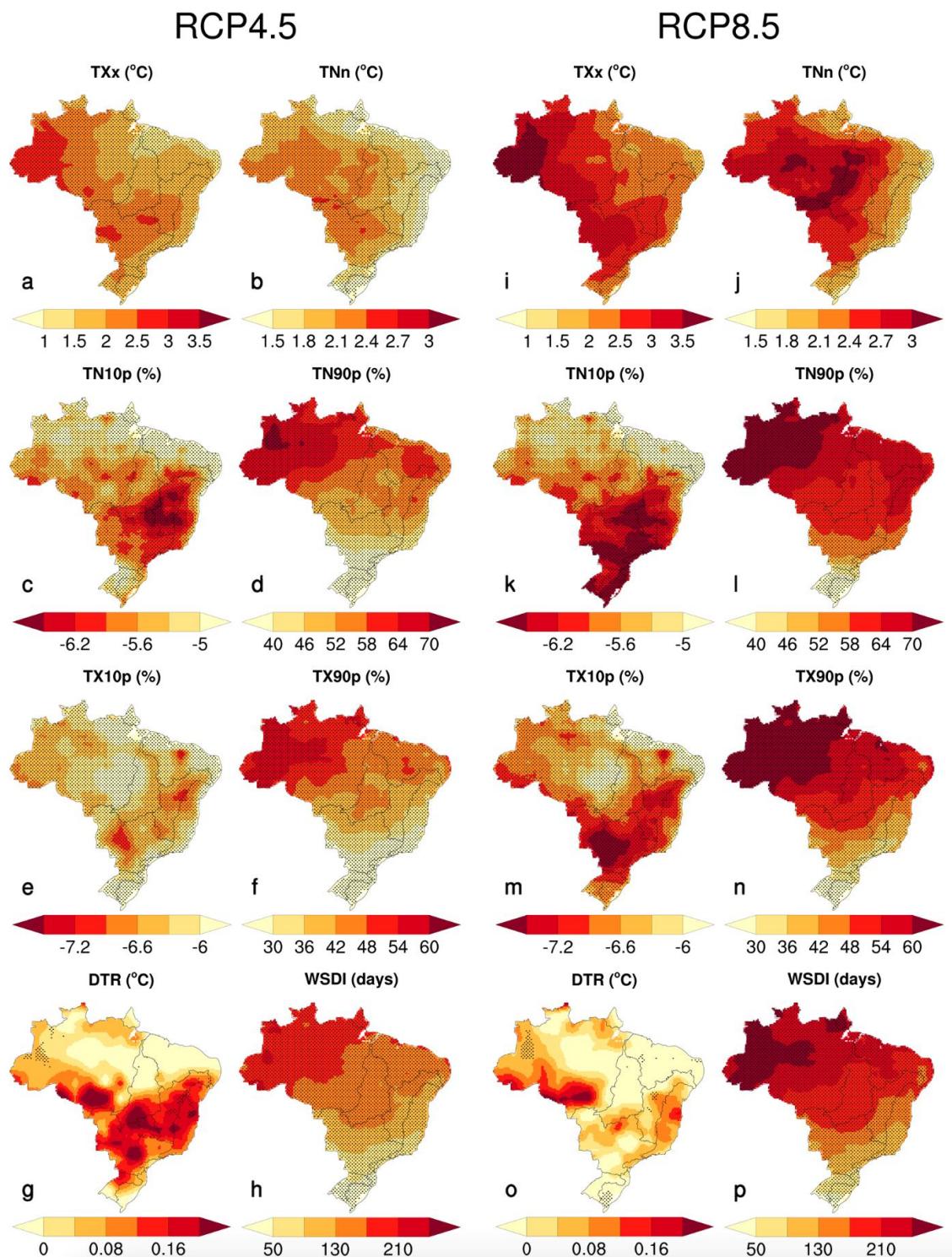


Figura 2.6 Mudanças futuras dos índices de temperatura em um conjunto de múltiplos modelos sob os cenários RCP4.5 (a–h) e RCP8.5 (i–p) para o período de 2046–2065 em relação ao período de referência (1986–2005). A mudança futura é computada como a diferença entre a média dos indicadores para o período 2046–2065 e o período de referência. O pontilhado indica pontos de grade onde mais de 66% dos modelos concordam com o sinal de mudança e mais de 50% dos modelos mostram uma mudança significativa. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020).

Em contraste com as mudanças de temperatura, na AMZ, as projeções da precipitação para o clima futuro indicam sinais heterogêneos espacialmente entre diferentes porções da região de estudo. Resultados de vários modelos apontam para uma redução na precipitação no leste da AMZ e um aumento nos períodos secos no sul e leste da região (BOISIER et al., 2015; LONGO et al., 2018; AVILA-DIAZ et al. 2020; REBOITA et al., 2022), dando continuidade portanto a um padrão que já vem sendo observado no clima presente. No setor oeste, espera-se uma diminuição nos totais pluviométricos anuais, acompanhada por uma redução nos dias úmidos. Na porção leste, além da diminuição da precipitação total anual e dos dias úmidos, as projeções também indicam uma redução na intensidade dos eventos extremos de chuva.

Avila-Diaz et al. (2020) verificaram que os modelos projetam uma redução da precipitação nas porções norte e leste da bacia Amazônica (Figura 2.7a, i) e o aumento do CDD em toda a extensão da bacia Amazônica e do Tocantins-Araguaia (Figura 2.7h, p), ou seja, em toda a ALB. Além disso, a projeção dos modelos indica uma redução dos dias úmidos consecutivos (CWD) (Figura 2.7g, o), também nessa mesma área.

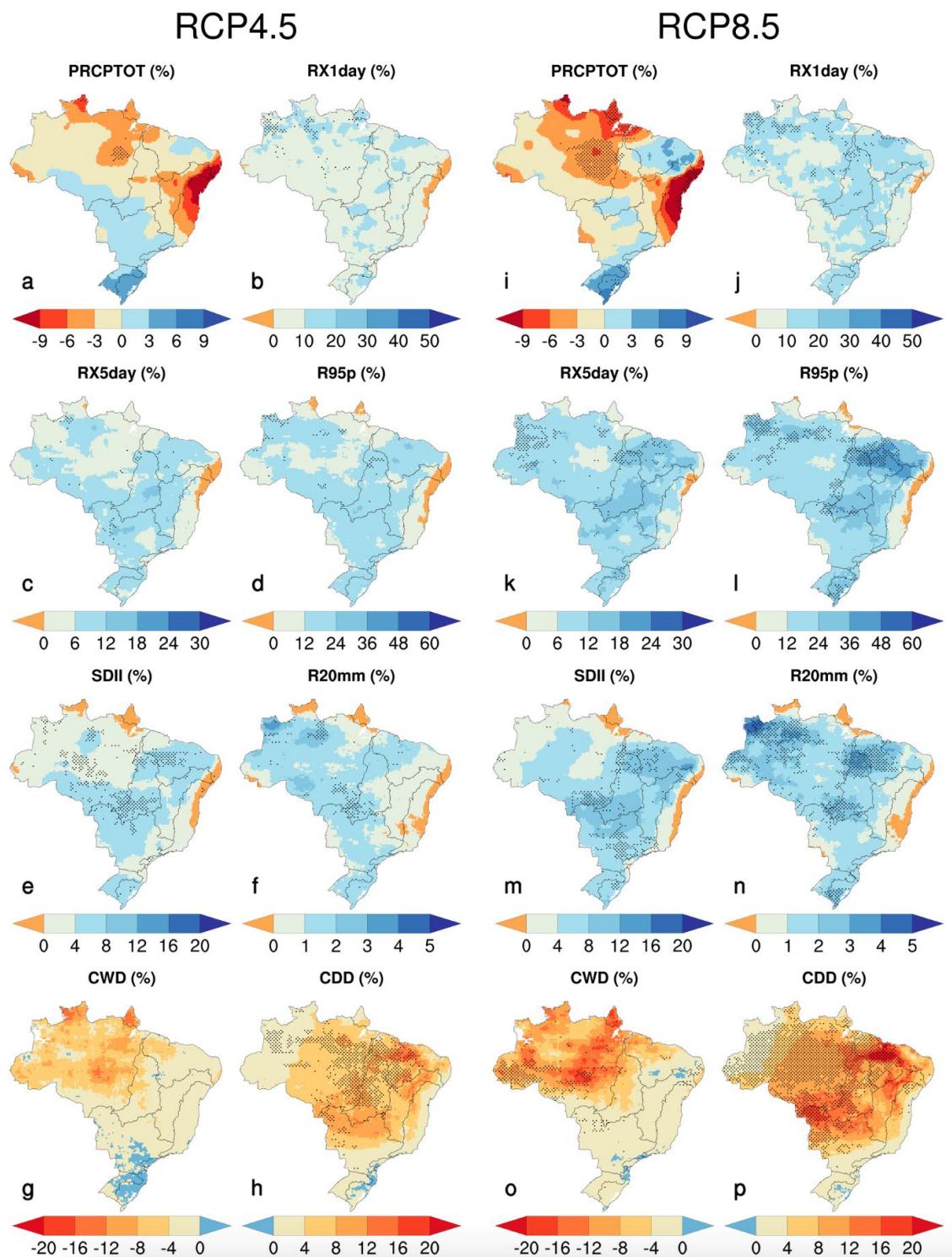


Figura 2.7 Mudanças futuras dos índices de extremos de precipitação em um conjunto de múltiplos modelos sob os cenários RCP4.5 (a–h) e RCP8.5 (i–p) para o período de 2046–2065 em relação ao período de referência (1986–2005). A mudança futura é computada como a diferença entre a média dos indicadores para o período 2046–2065 e o período de referência. Pontilhado indica pontos de grade onde mais de 66% dos modelos concordaram com o sinal de mudança e mais de 50% dos modelos mostram uma mudança significativa. Fonte: Avila-Diaz et al. (2020).

3 Dados e Metodologia

Neste capítulo apresentam-se os dados observacionais e dados dos modelos CMIP6, os indicadores de extremos climáticos e testes estatísticos utilizados neste trabalho. Os resultados são analisados espacialmente e também considerando as três áreas da ALB: Noroeste (NO), Nordeste (NE) e Sul (S), destacadas na Figura 2.1.

3.1 Dados Observacionais

A caracterização do clima de uma determinada região depende prioritariamente de dois fatores: da quantidade de estações meteorológicas disponíveis e da extensão e qualidade das séries temporais das variáveis analisadas. Atualmente a quantidade de informações disponíveis regionalmente é pequena para um país com dimensões continentais como o Brasil. Essa escassez de dados pode ser observada principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país, dificultando as pesquisas que têm como finalidade a caracterização climática e principalmente a detecção de tendências em extremos climáticos.

Neste trabalho decidiu-se adotar como “observação” os dados diários de temperaturas mínima e máxima do ar e precipitação do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD; XAVIER et al. 2022). Essa base de dados foi desenvolvida a partir da combinação das informações de estações meteorológicas de superfície do INMET e postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O método de interpolação utilizado é o IDW - Inverse Distance Weighted (SHEPARD 1968, 1984) e o ADW – Angular Distance Weighting (NEW et al., 2000). Além das variáveis temperatura do ar e precipitação, a plataforma disponibiliza também dados de evapotranspiração, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os dados do BR-DWGD abrangem o período de janeiro de 1961 até julho de 2020 (2022, no caso da precipitação) com uma resolução espacial de 0,1° de latitude por 0,1° de longitude.

Acerca do tratamento dos dados coletados de estações e pluviômetros, autores aplicaram dois procedimentos. Valores fora de um limite predeterminado foram removidos, para precipitação os limites são 0 e 450 mm/dia, enquanto para temperatura máxima e mínima o intervalo é de -30°C a 50°C. Em seguida, os pesquisadores realizaram um teste visual para verificar a homogeneidade dos dados de cada estação/pluviômetro,

comparando os dados de cada estação com os das estações vizinhas com base na metodologia descrita em Xavier et al. (2016). Este teste de homogeneidade visual consiste em plotar a série temporal de dados da estação junto com a média de dados de várias estações vizinhas. Esta média aproxima os dados como se fossem de uma estação de referência validada. O número de estações vizinhas foi selecionado de forma que houvesse pelo menos cinco dados vizinhos para calcular a média. Ao observar uma falta de homogeneidade na tendência em alguma parte da série temporal da estação avaliada, seus dados eram removidos.

Os métodos de interpolação estatísticos utilizados por Xavier et al., (2016; 2022) – ADW e IDW – para completar as lacunas dos dados observados possuem algumas limitações que reduzem sua aplicabilidade, sobretudo nos casos em que os dados são escassos (CAMERA et al., 2014), como se observa na região Norte do Brasil (Figura 3.1). Alguns estudos mostraram que o IDW tende a ter uma performance melhor em áreas com baixos totais pluviométricos (CAMERA et al., 2014) e, quando utilizado em regiões com totais pluviométricos maiores, tende a subestimar a chuva (TOBIN et al., 2011). Além disso, esses métodos não representam com precisão variáveis meteorológicas que variam espacialmente em grandes regiões (DALY, 2006)

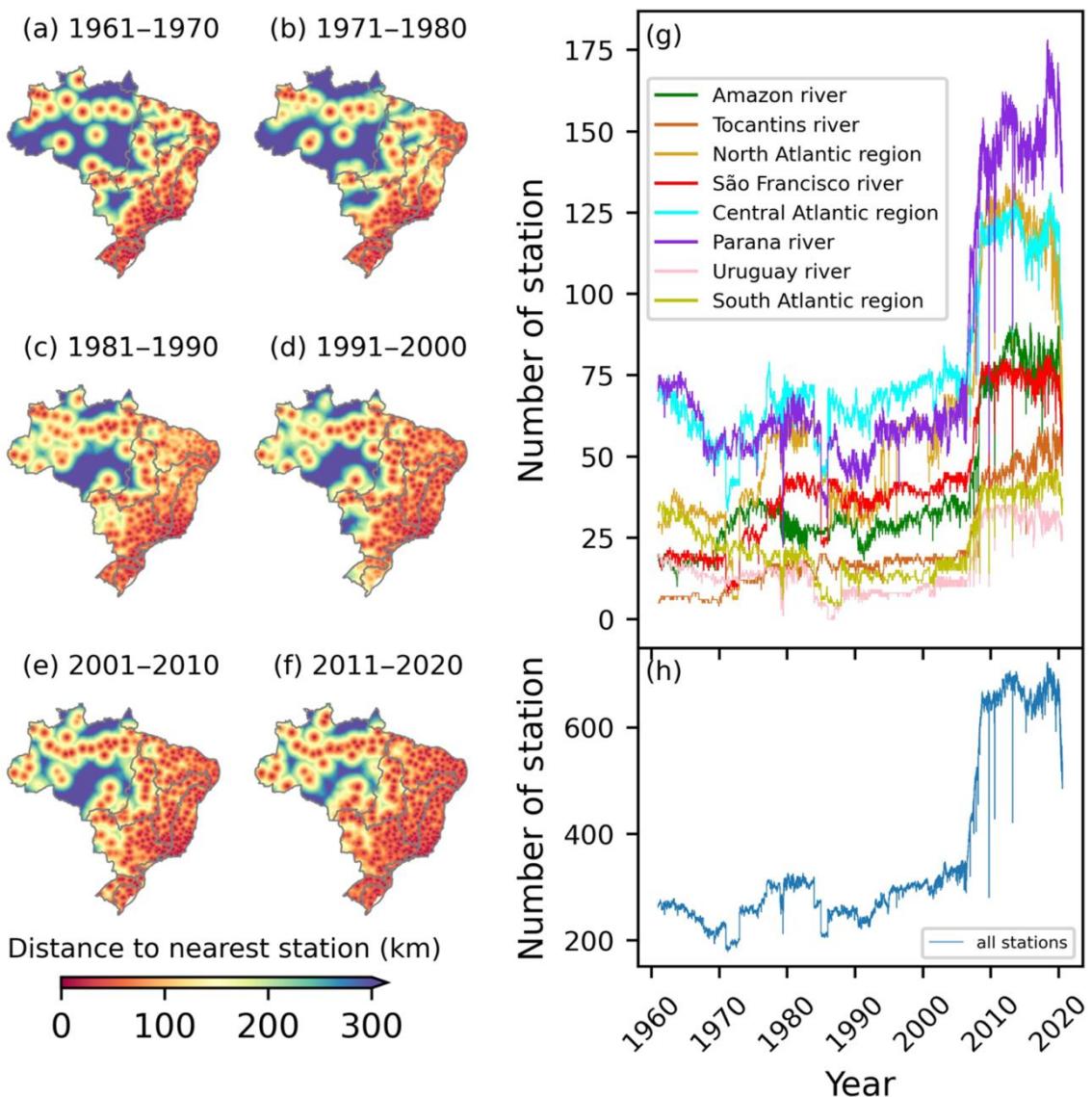


Figura 3.1 Distância média até a estação meteorológica mais próxima por década (a–f). Série temporal do número total de estações meteorológicas por bacia ao longo do tempo (g) e a série temporal do número total de estações meteorológicas no Brasil (h). Fonte: Xavier et al., 2022.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda que se tenha, em regiões com relevo homogêneo, uma estação a cada $10.000\ km^2$, e em regiões com muita variação de altitude, uma estação a cada $2.000\ km^2$. Considerando os critérios da OMM, a densidade de estações é baixa na bacia do Rio Amazonas, com uma estação a cada $250.000\ km^2$ até 2003, e uma a cada $150.000\ km^2$ de 2003 até os dias atuais (XAVIER et al. 2022). Até os anos 2000, havia menos de 50 estações meteorológicas na bacia, e a partir de 2010, a quantidade de estações na região aproximadamente dobrou. O mesmo ocorre na bacia do Rio Tocantins, que, assim como o Rio Amazonas, também tem parte do seu território na ALB. Assim, é importante realçar que devido a baixa densidade de estações meteorológicas e postos pluviométricos na ALB, a interpolação elaborada por

Xavier et al. (2022) e utilizada neste trabalho, tem qualidade reduzida. Apesar disso, o BR-DWGD representa melhor os padrões de temperatura e precipitação observados no Brasil comparativamente às outras bases de dados disponíveis (AVILA-DIAZ et al., 2020a, 2020b; LUCAS et al., 2021). Além disso, esse conjunto de dados já foi utilizado em diversas aplicações no Brasil, incluindo a análise de eventos de seca severa (MEDEIROS et al., 2020a; MEDEIROS e OLIVEIRA, 2021), índices de extremos climáticos (SILVA et al., 2019; LUCAS et al., 2021; MEDEIROS et al., 2022) e avaliação de modelos climáticos (CORREA et al., 2022; ALVES et al., 2023).

Neste estudo, o período utilizado para analisar as tendências de extremos de temperatura do ar se estende de 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2019 (59 anos) e para as tendências de extremos de precipitação, de 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2021 (61 anos). Para as análises climatológicas, optou-se por utilizar o período de dados mais próximo a normal climatológica do INMET (1991-2020). Assim, para a temperatura do ar o período utilizado se estende de janeiro de 1991 a dezembro de 2019 (29 anos) e para precipitação de janeiro de 1991 a dezembro de 2020 (30 anos).

3.2 Modelos CMIP6

Desde 1995, o CMIP tem organizado experimentos de modelos climáticos envolvendo grupos de modelagem climática internacional. Isso tem levado a um melhor entendimento do passado, presente, e futuro do clima. Tais experimentos CMIP têm sido a base para os relatórios de avaliação do IPCC. Atualmente, o CMIP se encontra em sua sexta fase (CMIP6), que consiste em alguns experimentos comuns, como o DECK (Diagnostic, Evaluation and Characterisation of Klima), as simulações históricas (1850-presente), e um conjunto Endorsed Model Intercomparison Projects (MIPs). Detalhes do Projeto CMIP6 podem ser encontrados no sítio eletrônico <https://es-doc.org/cmip6/>.

De acordo com Medeiros et al. (2022), os modelos CMIP6 demonstram um desempenho superior na região Norte do Brasil em comparação com as gerações anteriores de modelos, CMIP3 e CMIP5. Outros estudos, como o de Brumatti et al. (2024) investigaram a performance dos modelos CMIP6 quanto a representação de alguns indicadores de extremos climáticos no Brasil. Brumatti et al. (2024) apontam os modelos ACCESS-ESM1-5, EC-EARTH3 e CMCC-ESM2 dentre os de melhor performance sobre o Brasil.

Os modelos CMIP6 utilizados neste trabalho foram escolhidos com base no artigo de Bazzanella et al. (2024), que avaliou a performance de 28 modelos CMIP6 (28-CMIP6) sobre a América do Sul. Os autores identificaram os sete modelos que apresentam a melhor performance, denominado Top7-CMIP6-AS (ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, MIROC6, MRI-ESM2-0, TaiESM1 e KACE-1-0-G) e os quatro modelos CMIP6 com pior performance sobre a América do Sul (AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, IITM-ESM e NESM3). Essa seleção foi elaborada considerando a performance dos modelos para representar os campos de temperatura e precipitação, com ênfase nos modelos que obtiveram a melhor performance na simulação da precipitação no período do verão. Entretanto, os autores afirmam que o conjunto Top7-CMIP6-AS não apresentou melhorias significativas em relação ao conjunto 28-CMIP6.

Dessa forma, neste trabalho optou-se por utilizar o conjunto 28-CMIP6, excluindo apenas os quatro piores modelos apontados no estudo de Bazzanella et al. (2024). A partir dessa lista inicial de 24 modelos CMIP6, foi feita uma pesquisa em <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/> a fim de identificar se os dados diários dos 24 modelos pré-selecionados estariam disponíveis para todos os períodos e cenários de interesse neste trabalho. Nessa etapa da pesquisa identificou-se que apenas 12 modelos poderiam ser usados nesta pesquisa (ver Tabela 3.1). Neste trabalho, serão analisadas as projeções dos indicadores de extremos climáticos para o médio prazo (2041-2060) e o final do século (2081-2100) sob o cenário SSP mais pessimista (SSP5-8.5) utilizando o conjunto dos 12 modelos apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Informações sobre os modelos CMIP6 utilizados neste estudo.

Modelo	País/região	Instituição	Resolução horizontal	Membro do Conjunto
ACCESS-ESM1-5	Austrália	CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	250 km	r1i1p1f1
CanESM5	Canadá	CCCma Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	500 km	r1i1p1f1
CMCC-ESM2	Itália	CMCC Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	100 km	r1i1p1f1

Tabela 3.1. Continuação.

Modelo	País/região	Instituição	Resolução horizontal	Membro do Conjunto
CNRM-ESM2-1	França	CNRM e CERFACS Centre National de Recherches Météorologiques e CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	250 km	r1i1p1f2
EC-EARTH3	Europa	EC-Earth consortium	100 km	r1i1p1f1
HADGEM3-GC31-LL	Reino Unido	MOHC Met Office Hadley Centre	100 km	r1i1p1f3
INM-CM5-0	Rússia	INM Institute for Numerical Mathematics	100 km	r1i1p1f1
KACE-1-0-G	Coreia	NIMS-KMA National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration	250 km	r1i1p1f1
MIROC6	Japão	MIROC consortium JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS	250 km	r1i1p1f1
MPI-ESM1-2-HR	Alemanha	MPI-M Max Planck Institute for Meteorology	100 km	r1i1p1f1
MRI-ESM-2.0	Japão	MRI Meteorological Research Institute	100 km	r1i1p1f1
TaiESM1.0	Tailândia	AS-RCEC Research center for environmental changes, academia sinica	100 km	r1i1p1f1

O período e cenário foram escolhidos, com base nos resultados de Almazroui et al. (2021). Os pesquisadores mostraram que a magnitude da mudança da precipitação projetada só é superior a variabilidade do clima presente no cenário SSP5-8.5.

Os SSPs descrevem futuros plausíveis da sociedade ao longo do século XXI e diferem quanto aos desafios socioeconômicos para mitigação e adaptação às mudanças climáticas (Rothman et al., 2014; Schweizer e O'Neill, 2014), sem considerar os impactos climáticos nem a adoção de novas políticas. O SSP5 inclui um pico e um declínio na população (~7 bilhões em 2100), alta renda, redução das desigualdades e livre comércio. Este caminho inclui produção, consumo e estilos de vida intensivos em recursos. Em relação a outros caminhos, o SSP5 apresenta altos desafios para a mitigação, mas baixos desafios para a adaptação, ou seja, alta capacidade adaptativa (IPCC, 2019).

Os SSPs podem ser combinados com Caminhos de Concentração Representativa (RCPs) que implicam diferentes níveis de mitigação, com implicações para a adaptação. Portanto, os SSPs podem ser consistentes com diferentes níveis de aumento da temperatura média global da superfície, conforme projetado por diferentes combinações SSP-RCP (IPCC, 2019).

O cenário SSP5-8.5 representa o desenvolvimento de uma sociedade apoiada no uso intensivo de combustíveis fósseis e, consequentemente, com alta emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs). Nesse cenário as emissões atuais de CO₂ praticamente dobram até 2050.

As saídas dos modelos CMIP6 são interpoladas para uma grade comum de 1° de latitude por 1° de longitude utilizando o método bilinear de interpolação. Os indicadores de extremos climáticos são então calculados para os 12 modelos CMIP6 e por fim, é computada a média do conjunto. A robustez das mudanças projetadas é identificada por ponto de grade onde (i) o sinal da mudança se apresenta em pelo menos 66% dos modelos (8 modelos) e (ii) a magnitude da mudança é estatisticamente significativa em pelo menos 66% dos modelos. As mudanças climáticas são calculadas como o resultado da diferença entre as simulações futuras e a saída histórica dos modelos no clima presente (1995-2014).

3.3 Indicadores de Extremos Climáticos

Os valores extremos de precipitação e de temperatura impactam de maneira mais expressiva o meio ambiente e a sociedade em geral (IPCC, 2021). Os indicadores de extremos climáticos utilizados nesta pesquisa foram elaborados pelo Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) da Comissão de Climatologia (CCl) da OMM. O conjunto dos 27 indicadores ETCCDI foi desenvolvido com base em dados diários de temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação para identificação de tendências (KARL et al. 1999; FRICH et al. 2002).

Os indicadores de extremos climáticos podem ser divididos em 5 principais categorias: índices baseados em percentis (frequência abaixo ou acima de um dado percentil da climatologia); índices absolutos (valores extremos observados num determinado período); índices fundamentados em limiares pré-determinados (frequência

com que uma variável se estabelece abaixo ou acima de um dado valor); índices com duração definida (persistência de atuação de um determinado extremo climático); e outros indicadores, como a média simples. A Tabela 3.2 mostra a relação dos indicadores utilizados para a estruturação e avaliação dos extremos climáticos neste trabalho.

Tabela 3.2. Descrição dos Indicadores de Extremos Climáticos utilizados no presente trabalho. Os indicadores marcados com * não pertencem ao ETCCDI.

<i>ID</i>	<i>Nome do Indicador</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
TMAXmean*	Temperatura Máxima (TX) Média	TX Média	°C
TMINmean*	Temperatura Mínima (TN) Média	TN Média	°C
DTR	Amplitude Térmica Diária	Diferença Média Anual entre TX e TN	°C
TXx	Máxima TX	Maior temperatura máxima diária no mês	°C

Tabela 3.2. Continuação.

<i>ID</i>	<i>Nome do Indicador</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
TXn	Mínima TX	Menor temperatura máxima diária no mês	°C
TNx	Máxima TN	Maior temperatura mínima diária no mês	°C
TNn	Mínima TN	Menor temperatura mínima diária no mês	°C
TX90p	Dias Quentes	Nº de dias em que TX > Percentil 90	Dias
TX10p	Dias Frios	Nº de dias em que TX < Percentil 10	Dias
TN90p	Noites Quentes	Nº de dias em que TN > Percentil 90	Dias
TN10p	Noites Frias	Nº de dias em que TN < Percentil 10	Dias
WSDI	Indicador de Duração das Ondas de Calor	Contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos quando TX > Percentil 90	Dias
WSFI*	Indicador de Frequência das Ondas de Calor	Contagem anual de eventos quando pelo menos 6 dias consecutivos TX > Percentil 90	Eventos
SU35	Dias de Verão	Contagem anual de dias quando TX > 35°C	Dias
PRCPTOT	Precipitação Total Anual	Precipitação (PRCP) total anual dos dias em que PRCP > 1 mm	mm
R95p	Dias muito chuvosos	Precipitação total anual dos dias em PRCP > Percentil 95	mm
RX5day	Máximo acumulado de 5 dias de chuva	Máxima PRCP em 5 dias consecutivos no ano	mm

SDII	Índice de intensidade diária simples	PRCP total anual dividido pelo nº de dias úmidos (PRCP > 1 mm) no ano	mm/dia
R30mm	Número de dias acima de 30 mm	Contagem anual de dias em que PRCP >= 30mm	Dias
CDD	Dias secos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos em que PRCP < 1 mm	Dias
CWD	Dias úmidos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos em que PRCP > 1 mm	Dias

Todos os indicadores de extremos climáticos foram calculados utilizando a biblioteca xclim acoplada ao software Python. A documentação da biblioteca utilizada pode ser encontrada na plataforma do GitHub (<https://xclim.readthedocs.io/en/v0.32.1/indices.html>).

3.4 Testes Estatísticos

3.4.1 Teste de Mann-Kendall

Para analisar a significância estatística das tendências dos indicadores de extremos climáticos, foi empregado o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). A hipótese nula do teste é a de que não há aumento ou decréscimo da tendência nas séries temporais. O teste assume que a sucessão dos valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade se mantém, ou seja, os dados não precisam pertencer a uma distribuição específica. Outra vantagem é que os resultados são pouco afetados por valores outliers, uma vez que o cálculo é baseado no sinal das diferenças e não nos valores da variável em si. O teste de Mann-Kendall é muito robusto em comparação a outros testes paramétricos e, por esse motivo, é amplamente utilizado em pesquisas que buscam detectar tendências em séries temporais muito longas (MARENGO et al., 2010; SANSIGOLLO e KAYANO, 2010; KUMAR et al., 2013; WESTRA et al., 2013; ZILLI et al., 2017; LUIZ-SILVA et al., 2019; REGOTO et al., 2021; COLLAZO et al., 2022). A fórmula para o cálculo do teste estatístico de Mann-Kendall é dada a seguir:

$$Z = \frac{S + u}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad (1)$$

onde $\text{VAR}(S)$ é a variância e $u = -1$ se $S > 0$; $u = 0$ se $S = 0$; e $u = +1$ se $S < 0$ logo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (2)$$

onde:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 1 \text{ se } x_j - x_k > 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 0 \text{ se } x_j - x_k = 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = -1 \text{ se } x_j - x_k < 0$$

e:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

Na Equação 2, x corresponde a série temporal, variando de k ($j = k+1$) a n . O número de grupos de valores repetidos é dado por g (uma diferença nula entre os valores comparados) e o número de valores repetidos em cada grupo r (até g) é representado pela letra n na Equação 3. A tendência é indicada pelo valor Z na Equação 1, onde um valor positivo (negativo) de Z equivale a um aumento (decréscimo) da tendência pela distribuição normal. Se a probabilidade (p) do teste de Mann-Kendall é igual a ou menor que o nível de significância α no teste bilateral, então existe uma tendência estatisticamente significativa, onde um p -value maior que α confirma a tendência não significativa. O nível de significância α adotado neste trabalho é de 0.05 ou 5%, equivalente a um nível de confiança beta de 0.95 ou 95%.

3.4.2 Teste da Curvatura de Sen

Para avaliar a magnitude das tendências dos indicadores de extremos climáticos, foi utilizado o teste da Curvatura de Sen (SEN, 1968). Assim como o teste de Mann-Kendall, o teste da Curvatura de Sen é um método não paramétrico baseado na hipótese de uma tendência linear, e tem sido amplamente utilizado para estimar a magnitude de tendências. Para computar a Curvatura de Sen, as curvaturas de todos os pares de valores numa série temporal são calculadas da seguinte forma (Equação 4):

$$SEN = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j-i} \right), \forall j > i \quad (4)$$

onde x_j é o valor do indicador em um determinado ano, enquanto x_i é o valor no ano anterior. O teste da Curvatura de Sen não é sensível a valores outliers ou dados faltantes, o que torna o teste mais rigoroso que as curvaturas de regressão usuais, além de fornecer um resultado mais realista das tendências das séries temporais.

3.4.3 Teste t de Student

A fim de verificar a robustez das mudanças projetadas dos indicadores de extremos climáticos, utiliza-se o teste t de Student (STUDENT, 1908; WILKS, 2011), amplamente utilizado em estudos que buscam verificar a significância estatística das simulações dos modelos climáticos (DESER et al., 2012; DERECHYNSKI et al., 2020; REBOITA et al., 2021). Dentre outras técnicas mais avançadas disponíveis, esse teste se mostrou equivalente ou, algumas vezes, mais adequado para avaliar a significância estatística do sinal projetado pelos modelos climáticos (DECREMER et al., 2014). Essa técnica usa a razão sinal-ruído (valor t) para avaliar a significância estatística do sinal comparado ao ruído. No contexto de simulações climáticas, o sinal é a mudança climática provocada por uma forçante externa. Neste trabalho, foi utilizado o teste t de Student bicaudal, sendo assim, baseia-se na diferença entre a média da mudança projetada e a média histórica do modelo. Ele testa se a diferença entre as médias de duas amostras (neste caso, o clima presente e o clima futuro) é suficientemente grande para ser atribuída a um fator significativo (mudança climática) e não ao acaso. O valor t é calculado como na Equação 5 abaixo:

$$t = \frac{\bar{x}_{pres} - \bar{x}_{fut}}{\sqrt{\frac{s_{pres}^2}{n_{pres}} + \frac{s_{fut}^2}{n_{fut}}}} \quad (5)$$

Onde \bar{x}_{pres} e \bar{x}_{fut} representam as médias do indicador atreladas ao clima presente e futuro, respectivamente, enquanto s_{pres}^2 e s_{fut}^2 são as suas variâncias. Por fim, n_{pres} e n_{fut} representam o tamanho das amostras, que são iguais a 20, uma vez que o clima presente (1995-2014) e o clima futuro (2041-2060 e 2081-2100) são representados por um período de 20 anos de dados. Se o valor absoluto da estatística t calculada for maior que o valor crítico para o nível de confiança $\alpha = 0,05$ (95% de confiança), rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que a mudança projetada do indicador é estatisticamente significativa. O teste t de Student é calculado para cada um dos 12 modelos contemplados neste estudo.

4 Resultados

Na primeira parte deste capítulo apresenta-se a caracterização do clima presente na ALB através da análise dos campos médios e dos extremos climáticos de temperatura e precipitação. Além disso elabora-se uma análise das tendências observadas dos indicadores de extremos climáticos nas três regiões da ALB: NO, NE e S. Por fim, a segunda parte discute as projeções desses indicadores para a ALB considerando os períodos de médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazos, sob o mesmo cenário SSP5-8.5.

4.1 Climatologia e Tendências dos Extremos Climáticos

Observados sobre a ALB

4.1.1 Indicadores de Temperatura

Na Figura 4.1 apresenta-se as climatologias anuais e as tendências observadas dos indicadores TMAXmean, TMINmean e DTR, e também são exibidas as séries temporais anuais desses indicadores para cada setor da ALB: NO, NE e S. As climatologias são calculadas para o período de 1991 a 2019, totalizando 29 anos de dados (média de 10.585 valores), enquanto as tendências decadais e as séries temporais são calculadas para o período de 1961 a 2019, totalizando 59 anos de dados. A Tabela 4.1 apresenta as tendências dos extremos de temperatura do ar computados para as regiões NO, NE e S.

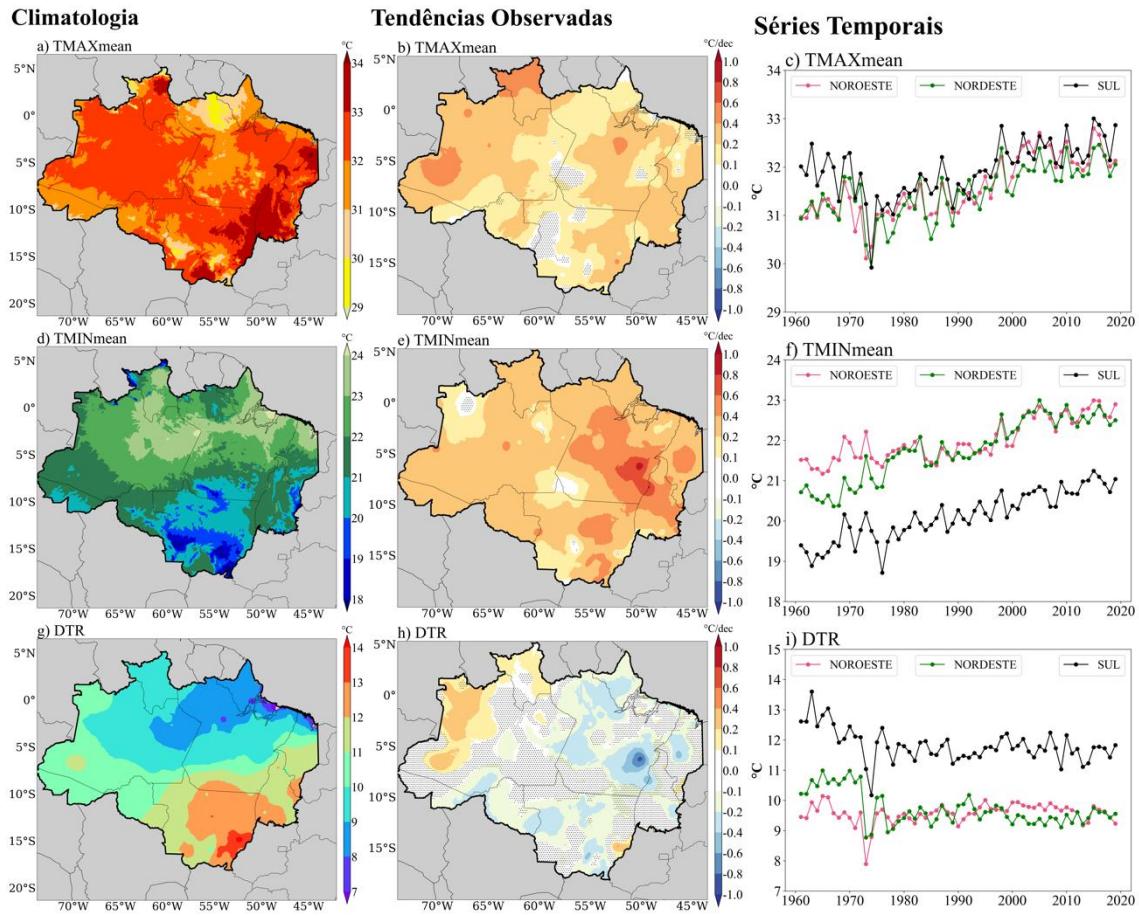


Figura 4.1 Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991-2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C computadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos de temperatura do ar: (a), (b) e (c) TMAXmean, (d), (e) e (f) TMINmean, e (g), (h) e (i) DTR. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Tabela 4.1 Magnitudes das tendências dos indicadores de extremos de temperatura do ar no período 1961-2019, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Valores em negrito denotam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

<i>Indicadores</i>	<i>NO</i>	<i>NE</i>	<i>S</i>	<i>Unidade</i>
TMAXmean	+0,3	+0,2	+0,2	°C/déc.
TMINmean	+0,3	+0,4	+0,3	°C/déc.
DTR	0	-0,2	-0,1	°C/déc.
TXx	+0,3	+0,3	+0,4	°C/déc.
TXn	+0,2	+0,1	+0,1	°C/déc.
TNx	+0,3	+0,4	+0,3	°C/déc.
TNn	+0,3	+0,5	+0,4	°C/déc.
TX90p	+10,8	+10,5	+8,1	Dias/déc.
TX10p	-6,8	-9,4	-3,7	Dias/déc.

TN90p	+14	+11,9	+13	Dias/déc.
TN10p	-14,6	-34,0	-16,9	Dias/déc.
WSDI	+2,3	+2,2	+1,7	Dias/déc.
WSFI	+0,7	+0,6	+0,6	Eventos/déc.
SU35	+4,3	+3,6	+8,0	Dias/déc.

Em razão dos elevados índices de radiação solar que incidem sobre a superfície da ALB durante todo o ano, a temperatura do ar é bastante elevada em praticamente toda a sua extensão (MARENGO 2006). A temperatura máxima exibe um comportamento bastante homogêneo espacialmente variando de 32 a 33°C na maior parte da área. No período chuvoso, o aumento da nebulosidade promove um leve declínio na temperatura máxima e o oposto ocorre no período seco, quando a temperatura máxima apresenta maiores valores (COLLOW et al., 2016). A porção leste da ALB apresenta um clima mais tipicamente tropical, com maiores temperaturas na época mais seca do ano. Observa-se por exemplo que em alguns trechos do setor leste e no extremo sul da região de estudo TMAXmean ultrapassa os 33°C. Nas áreas mais elevadas (ver Figura 2.1) do norte do PA, oeste do AP e sul do MT, as temperaturas máximas são um pouco mais baixas, não ultrapassando os 31°C. Em relação as tendências desse indicador (Figura 4.1b), as maiores magnitudes não ultrapassam o valor de +0,6°C/década e a tendência de aumento mais pronunciado da temperatura máxima do ar é observada no setor oeste e noroeste da ALB. Nota-se que o aquecimento mais acentuado na ALB começa a partir dos anos 1980 (Figura 4.1c), com taxas médias de até +0,3°C/década, principalmente na região NO, mas também nas regiões NE e S com taxas estatisticamente significativas de +0,2°C/década (Tabela 4.1). Na porção central da ALB, a magnitude das tendências é menor, além de apresentar algumas poucas áreas sem significância estatística. De 1980 a 2013, Almeida et al. (2017) também observaram uma taxa de aumento de até +0,4°C/década na temperatura máxima sobre a ALB. Nota-se que o aquecimento mais acentuado na ALB começou nos anos 1980, com taxas de aumento de 0,3°C/década, especialmente na região noroeste, mas também nas regiões nordeste e sul com taxas estatisticamente significativas de +0,2°C/década. De acordo com Gloor et al. (2015), tais mudanças observadas desde 1980 podem estar associadas a padrões da TSM dos oceanos Atlântico e Pacífico tropicais.

Por outro lado, o campo de TMINmean (Figura 4.1d) apresenta maior heterogeneidade espacial, com uma divisão clara entre os setores norte e sul da ALB. Na porção centro-sul, que abrange os estados do AC, MT e RO, as temperaturas mínimas não ultrapassam os 21°C na maior parte da região. No sul do MT, as temperaturas mínimas são inferiores a 17°C, devido à influência de massas de ar frio durante o inverno (RICARTE et al., 2015) e à topografia elevada, que ultrapassa os 700 metros de altitude (Figura 2.1). Já na porção centro-norte, as mínimas ultrapassam os 22°C, sendo os maiores valores de TMINmean observados no setor leste do AM e do AP, no norte do PA e em RR. As tendências observadas (Figura 4.1e), no entanto, apresentam uma divisão maior entre os setores leste e oeste, de modo que no setor leste da ALB, a magnitude da tendência de TMINmean é maior, com alguns pontos superando +0,6°C/década nos estados do TO, PA e oeste do MA. Enquanto no oeste e norte, a magnitude da tendência é mais homogênea, ficando em torno de +0,4°C/década. Apesar da diferença de TMINmean entre as três regiões da ALB, com valores cerca de 3°C mais elevados nas regiões NO e NE do que na região S, observa-se nas três regiões (NO, NE e S) uma clara tendência de aumento desse indicador no decorrer dos últimos anos (Figura 4.1f). A magnitude da tendência de TMINmean é maior do que TMAXmean, alcançando taxas médias de até +0,4°C/década, especialmente na região NE da ALB (Tabela 4.1).

O campo que mostra o comportamento médio da amplitude térmica diária (Figura 4.1g) exibe a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas diárias. Nos setores sul e leste da bacia, são observados os maiores valores de TMAXmean (Figura 4.1a) bem como os menores valores de TMINmean (Figura 4.1d), resultando em valores altos de DTR. Esse comportamento se repete no campo das tendências (Figura 4.1h), onde na porção central e leste da ALB, nota-se uma redução significativa desse indicador superior a 0,2°C/década, alinhado ao que foi apresentado nas tendências de TMAXmean e TMINmean, uma vez que as temperaturas mínimas apresentam uma tendência de aumento superior. No norte da ALB, as temperaturas máximas e mínimas apresentam seus menores e maiores valores, respectivamente, o que reduz, portanto, o valor do DTR. Na Figura 4.1i é possível observar que redução passou a ocorrer no final da década de 1990 no NE e S da ALB. Dessa forma, o campo de DTR exibe um gradiente norte/sul, com menores valores no norte, aproximadamente entre 8 e 9°C, e maiores valores no sul, entre 13 e 14°C. É no noroeste da ALB onde se observa o único sinal de aumento

significativo do DTR, onde na média, apresenta-se os menores valores do indicador. Esse sinal não é significativo na análise regional (Tabela 4.1).

Os resultados encontrados para TMINmean são semelhantes ao estudo de Jiménez-Muñoz et al. (2013), que verificou uma tendência de $+0,5^{\circ}\text{C}/\text{década}$ na porção central e sudeste da ALB analisando o período de 1979 a 2012 e utilizando dados do ERA-Interim. Já as tendências encontradas para TMAXmean e TMINmean são consistentes com Almeida et al. (2017), que encontraram um aumento de $0,4^{\circ}\text{C}/\text{década}$ na temperatura máxima e mínima do ar. É evidente que há uma tendência de aquecimento estatisticamente significativa em quase toda a extensão da ALB, com exceção do DTR, que apresenta um sinal de redução do indicador. A magnitude da tendência é maior em TMINmean em comparação com TMAXmean. Esse aumento mais pronunciado do aumento da temperatura mínima, em comparação com a temperatura máxima nas Regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, já foi apontado por outros estudos (DERECZYNSKI et al., 2020; ALVES et al., 2021; REGOTO et al., 2021).

A Figura 4.2 apresenta as climatologias e tendências dos indicadores associados aos valores extremos das temperaturas máximas: TXx e TXn. Nesses campos é importante ressaltar que estão sendo selecionados os extremos de cada ano. Assim, por exemplo, TXx refere-se a média de 29 valores das maiores temperaturas máximas observadas em cada ano.

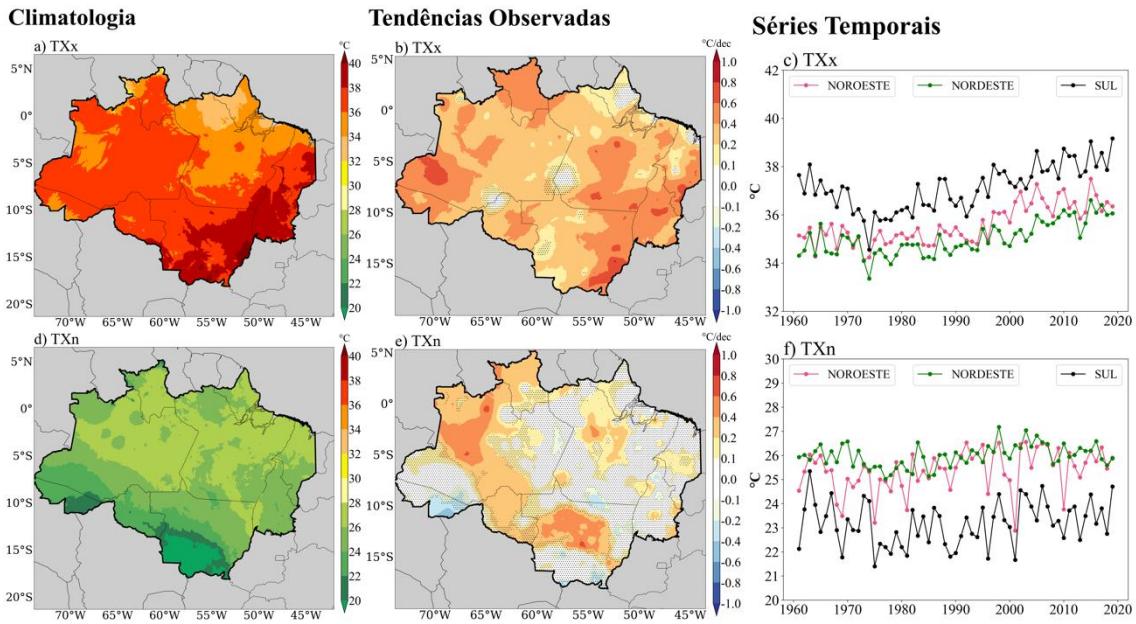


Figura 4.2. Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991-2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) TXx, e (d), (e) e (f) TXn. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Como esperado, o campo médio de TXx (Figura 4.2a) apresenta um padrão semelhante à sua climatologia (TMAXmean). Os valores mais altos (mais baixos) de TXx são notados nos setores sul e leste (norte) da ALB. No sul do MT, TXx ultrapassa os 40°C, condições essas mais comuns entre o final do inverno e início da primavera diante de bloqueios atmosféricos (MARQUES et al., 2000; MENDES et al., 2008; GEIRINHAS et al., 2018). Em relação as tendências observadas desse indicador (Figura 4.2b), há um aumento mais pronunciado nos setores oeste, leste e sudeste da ALB, se aproximando de +1°C/década, indicando uma tendência de que as maiores temperaturas máximas estão se elevando. Verifica-se que na região S da ALB os extremos quentes já se aproximam de 40°C ao longo da última década (Figura 4.2c), com taxa média de aumento de +0,4°C/década (Tabela 4.1).

No caso do indicador TXn (Figura 4.2d), os valores mais baixos (entre 20 e até 22°C) são encontrados na porção sul e oeste da ALB, enquanto os mais altos (26-28°C) são encontrados na porção central, norte e leste da ALB. Os valores baixos de TXn no sul do MT são resultado da entrada de massas de origem polar ao longo do ano, que alcançam latitudes mais baixas pelo interior do continente durante o inverno e a primavera austrais (RICARTE et al 2015; VIANA e HERDIES, 2018). Ao analisar as tendências desse indicador (Figura 4.2e), verifica-se que o sinal não é tão homogêneo espacialmente

quando comparado ao TXx, onde se observa uma tendência de resfriamento em algumas regiões, porém sem significância estatística. No estado do AC e em algumas outras áreas da ALB, é possível observar uma tendência de resfriamento estatisticamente significativa, indicando que as menores temperaturas máximas anuais estão diminuindo de magnitude. As séries temporais de TXn mediadas nas três regiões da ALB indicam que a variabilidade anual é maior nas regiões NO e S do que na região NE (Figura 4.2f). Outro ponto a se destacar é que na maior parte da ALB, o sinal das tendências de TXn não possui significância estatística, com exceção de alguns estados, sobretudo RO, RR e o centro-norte do AM e do MT. Estes últimos são os que apresentam a maior magnitude de aquecimento em TXn (+0,6°C/década).

A Figura 4.3 apresenta as climatologias e tendências dos indicadores associados aos valores extremos das temperaturas mínimas: TNx e TNn. O TNx é o que mostra um comportamento mais uniforme espacialmente (Figura 4.3a). Na maior parte da ALB, os valores ficam em torno de 24 a 26 °C. Destacam-se alguns setores do leste do AM (especialmente ao longo do rio Amazonas), RR, norte do PA e a porção central do TO, onde os valores de TNx são superiores a 26°C. Em relação as tendências desse indicador (Figura 4.3b), há um sinal de aquecimento estatisticamente significativa em toda a extensão da ALB. Nas porções oeste, norte e sul da área de estudo, a magnitude de aquecimento é de aproximadamente +0,4°C/década, enquanto na porção leste, esse aquecimento é mais pronunciado, superando 0,8°C por década em algumas localidades, como na região central do estado do TO, e no sudeste do PA e nordeste de MT, que engloba a bacia do Rio Xingu, conforme alinhado aos resultados encontrados por Luiz-Silva et al. (2022). Tal elevação em TNx no decorrer das últimas décadas são observadas nas séries temporais exibidas na Figura 4.3c.

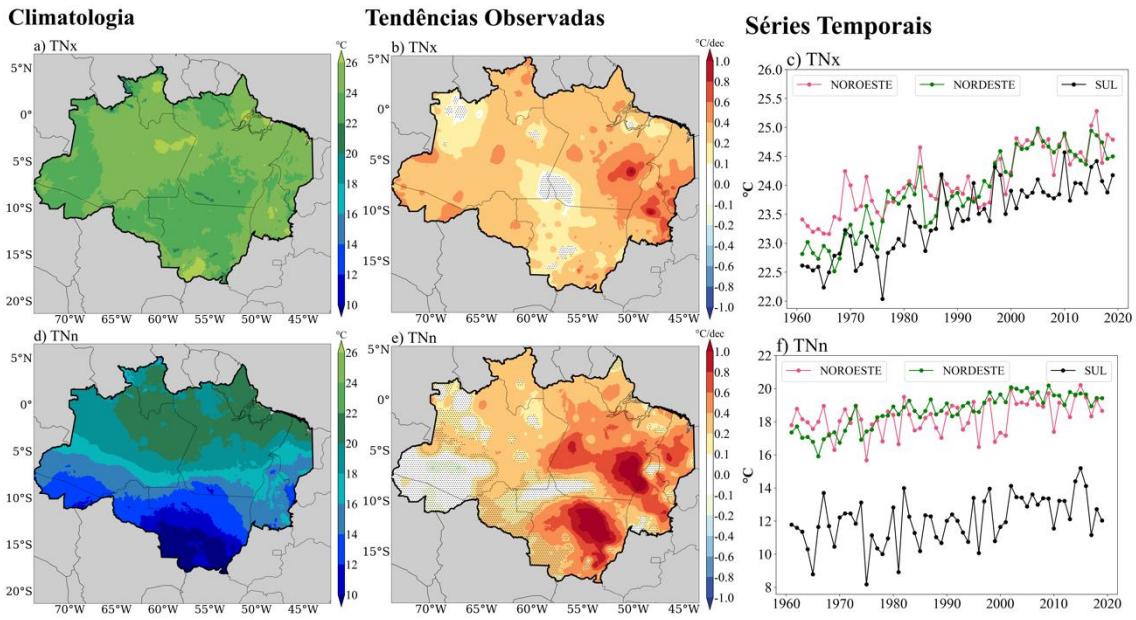
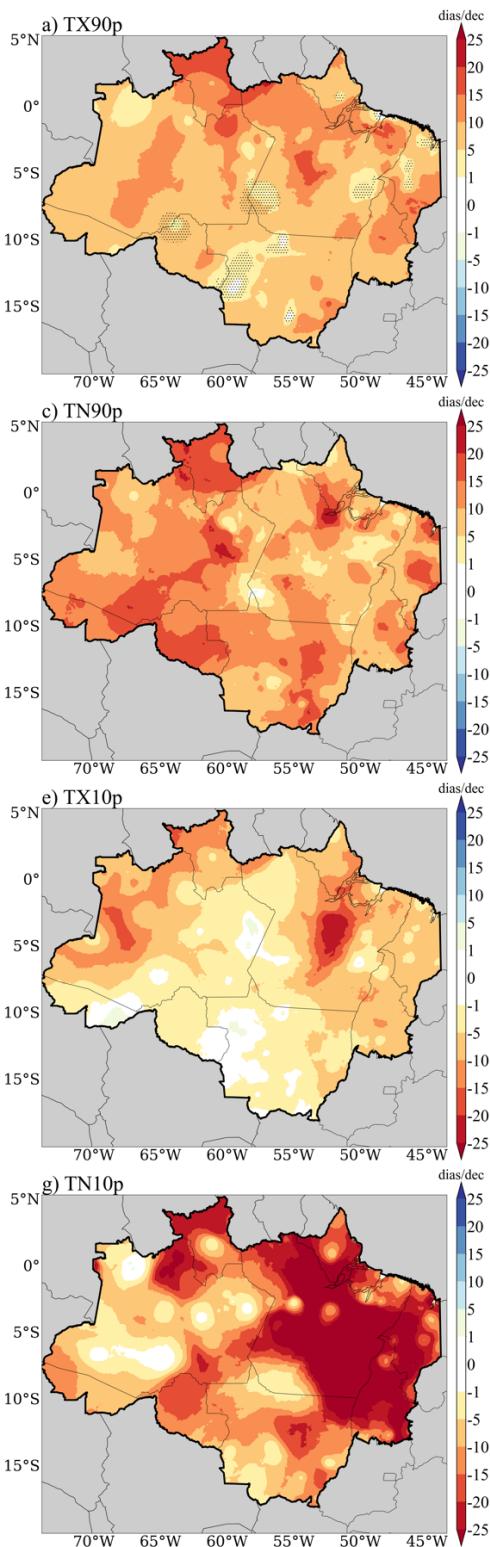


Figura 4.3. Climatologia (à esquerda) em °C para o período 1991-2019, tendências em °C/década (centro) e séries temporais em °C calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) TNx, e (d), (e) e (f) TNn. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Por fim, o campo médio de TNn é o que apresenta maior heterogeneidade espacial, seguindo o padrão de TMINmean, com diferenças acentuadas entre os setores norte e sul da ALB (Figura 4.3d). No norte, são registrados os maiores valores de TNn ($> 20^{\circ}\text{C}$), enquanto no sul, os valores do indicador são inferiores a 14°C . No sul do MT, as temperaturas mínimas mais baixas são inferiores a 10°C em eventos extremos de frio. Dentre os indicadores de máximos e mínimos, o que mais se destaca é o TNn (Figura 4.3e), uma vez que a tendência de aquecimento é estatisticamente significativa em todo o centro-leste da ALB. Ademais, nota-se uma tendência superior a $+1^{\circ}\text{C}/\text{década}$ que cobre uma porção do estado do MT, sudeste do PA e noroeste do TO. Esse aquecimento mais pronunciado e predominante no setor leste da ALB é consistente com o que foi observado em outros estudos, como o de Almeida et al. (2017). Essa região da ALB é reconhecida pelo intenso uso do solo, o qual pode ter resultado em alterações na cobertura vegetal, possivelmente contribuindo para o aumento da temperatura (NOBRE et al., 2016; MARENGO et al., 2018). A região NE da ALB apresenta a maior taxa média de crescimento de TNn ao longo dos últimos anos, com magnitude de $+0,5^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tabela 4.1). Nessa área, em média, TNn passou de 17°C nos anos 1960 para cerca de 20°C nos anos 2010 (Figura 4.3f).

Na Figura 4.4, são apresentadas as tendências dos indicadores associados à frequência de ocorrência de dias e noites quentes e de dias e noites frias: TX90p, TN90p, TX10p e TN10p. Todos exibem uma tendência de aquecimento, com aumento dos dias e noites quentes, juntamente com uma redução significativa dos dias e noites frios. Esses resultados estão alinhados com o estudo de Silva et al. (2019), que também identificou essa mesma tendência por meio da análise dos dados das estações de superfície disponíveis na região da ALB.

Tendências Observadas



Séries Temporais Anuais

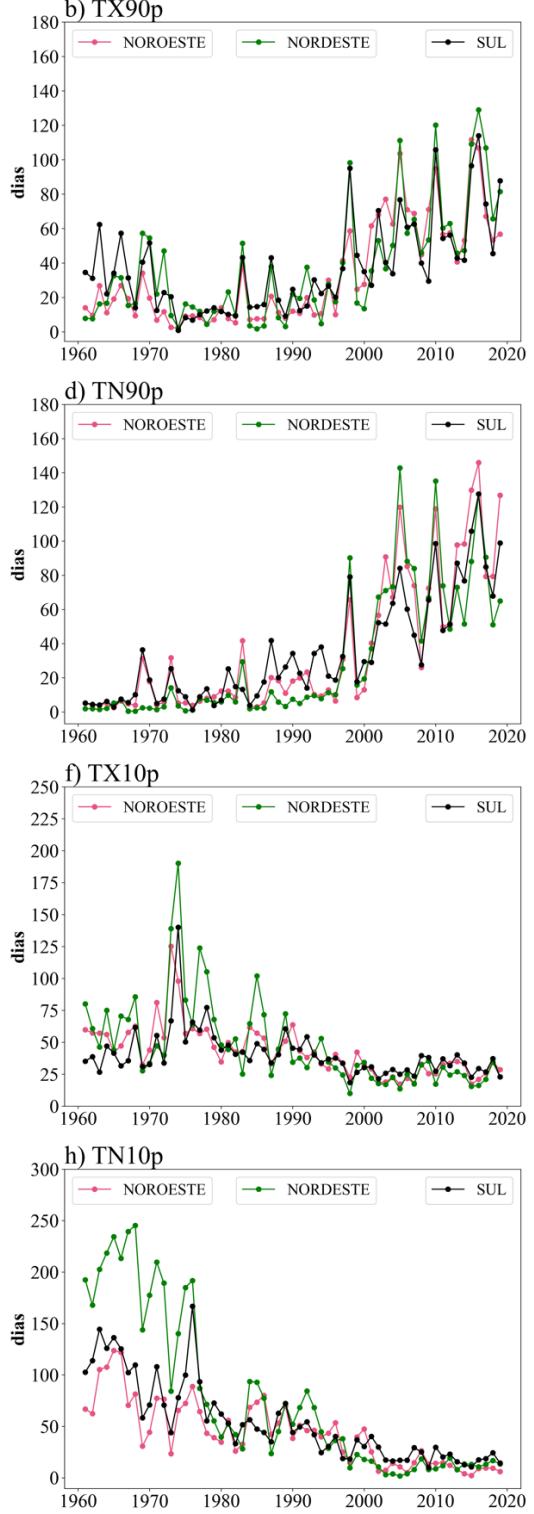


Figura 4.4. Tendências (à esquerda) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a) e (b) TX90p, (c) e (d) TN90p, (e) e (f) TX10p, e (g) e (h) TN10p. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Em relação aos dias quentes (TX90p; Figura 4.4a), observa-se um aumento superior a +15 dias/década no extremo norte da ALB e na porção central do estado do PA.

Nos últimos anos, TX90p passa dos 100 dias no ano em média nas três regiões da ALB (Figura 4.4b). Esse comportamento também é observado no indicador TN90p (Figura 4.4d) e a partir da década de 1990, possivelmente atrelado aos modos de variabilidade interanual que influenciam a região, tal como o ENOS, que tem impacto direto nos padrões de temperatura e precipitação da AMZ. Em sua fase positiva, é caracterizado por redução dos totais pluviométricos e aumento nas temperaturas (CAI et al., 2020; ESPINOZA et al., 2024), o que se verifica nas séries temporais apresentadas nas Figuras 4.4b e d, onde os indicadores TX90p e TN90p ultrapassam os 100 dias no ano em eventos de El Niño (1997/98, 2009/10, 2015/16; PANISSET et al., 2018).

Em relação as tendências observadas, o cenário é distinto para as noites quentes (TN90p; Figura 4.4c), com uma tendência de aumento mais pronunciada em toda a extensão da ALB, especialmente no centro-oeste e extremo norte, ultrapassando a marca de +20 dias/década em algumas regiões, chegando a mais de 120 noites quentes no ano em média nas últimas duas décadas em toda a ALB (Figura 4.4d). Dentre as três regiões da ALB, a região NO é a que apresenta as maiores taxas médias de aumento na frequência de ocorrência de noites quentes no decorrer dos últimos anos, com uma magnitude de até +14 dias/década (Tabela 4.1).

Quanto aos dias frios (TX10p; Figura 4.4e), nota-se uma redução desse indicador em toda a ALB, embora a magnitude da tendência seja inferior a -10 dias/década na porção leste e centro-sul da região. A redução dos dias frios é mais expressiva na porção central do estado do PA e no setor noroeste da ALB como um todo, ultrapassando os -15 dias/década. Nas três regiões da ALB, os dias frios passaram de 50 a 75 dias no ano para cerca de 25 a 50 dias em média num intervalo de 60 anos (Figura 4.4f). O indicador que se destaca é o TN10p (Figura 4.4g), revelando uma forte redução estatisticamente significativa das noites frias em todo o setor leste e norte da ALB. A magnitude do sinal nessas regiões é superior a -25 dias/década, enquanto na porção sul e oeste, a magnitude da tendência é consideravelmente menor, ficando abaixo de -15 dias/década. As noites frias no ano diminuíram de aproximadamente 150 noites para menos de 50 noites em média nas últimas décadas nas três regiões da ALB (Figura 4.4h).

Na Figura 4.5, são apresentadas as climatologias e tendências observadas dos indicadores SU35, WSDI e WSFI, que estão atrelados a duração e frequência dos eventos. No caso do indicador SU35, que contabiliza o número de dias no ano com TX superior a

35°C (Figura 4.5a), os valores são mais altos nos setores sudeste e leste da ALB. Em cerca de um terço do ano (SU35 > 100 dias) registram-se temperaturas máximas superiores a 35°C no extremo sul do MT e no TO. E são nessas regiões, especialmente no leste da ALB, onde se verifica uma tendência de aumento desse indicador superior a +10 dias/década (Figura 4.5b), ou seja, há uma tendência de aumento na frequência de ocorrência de dias quentes, onde climatologicamente já se concentra a maior ocorrência de dias quentes. Logo, a região S da ALB apresenta o mais claro aumento de SU35 (Figura 4.5c), alcançando nos últimos anos mais de 60 dias no ano nesta condição, numa taxa média de elevação de +8 dias/década (Tabela 4.1). Essa conformidade com a climatologia também ocorre no centro-oeste da ALB, onde a maior parte dos valores médios não ultrapassa os 30 dias e a magnitude das tendências não é superior a +6 dias/década.

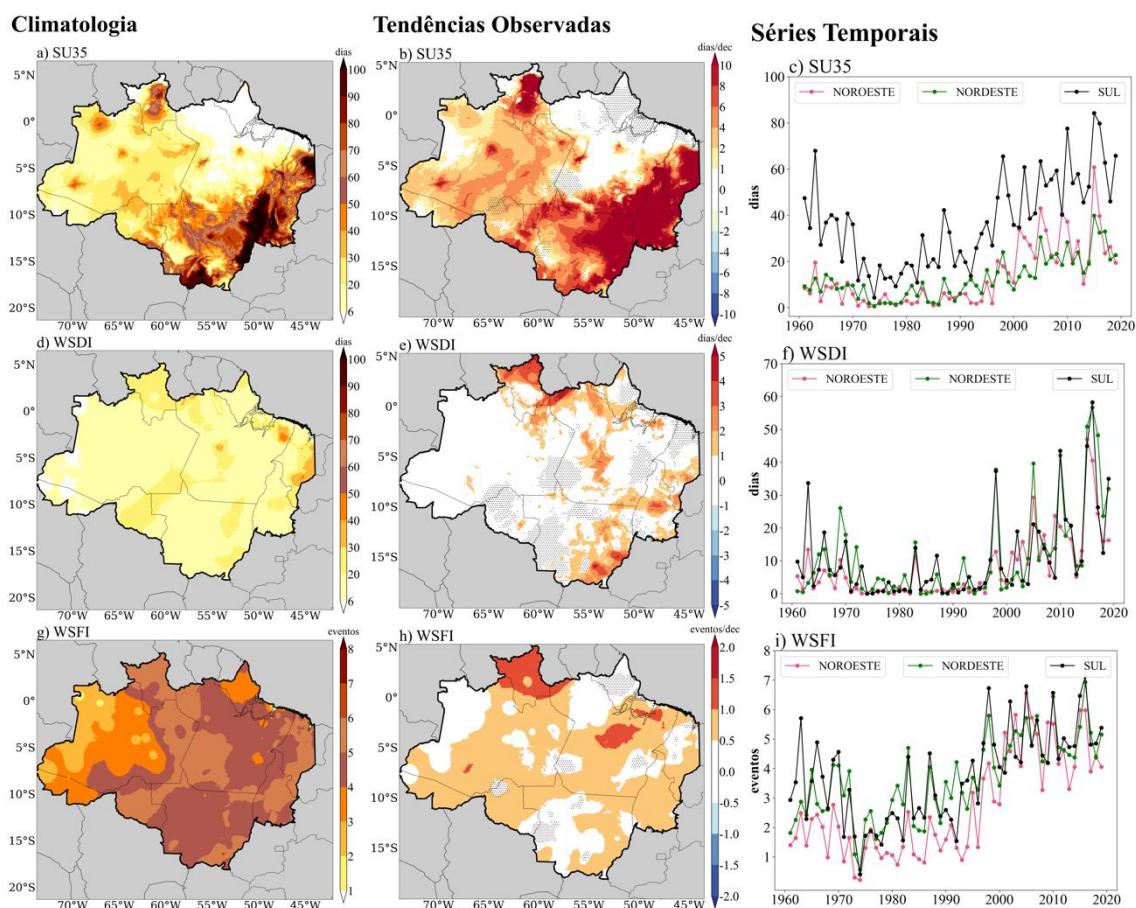


Figura 4.5. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2019, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2019 dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar: (a), (b) e (c) SU35, (d), (e) e (f) WSDI, e (g), (h) e (i) WSFI. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Quanto ao WSDI (Figura 4.5d), ondas de calor, o extremo leste da ALB experimenta em média mais de 30 dias consecutivos por ano com temperaturas máximas

muito elevadas ($TX >$ percentil 90). Por outro lado, na maior parte da porção sul, central e norte, os valores médios do indicador são inferiores a 20 dias. É interessante observar que no AC e no AM, por exemplo, os valores do indicador são inferiores a 10 dias. Essa variação do indicador, que é maior no setor oeste da região, está novamente associada ao padrão de nebulosidade observada. Em relação as tendências (Figura 4.5e), é interessante notar que a direção e a distribuição espacial é muito semelhando ao que se observa para o SU35. Do mesmo modo, a duração das ondas de calor (WSDI) também apresenta uma tendência de aumento estatisticamente significativa em +3 dias/década nessas mesmas regiões, com destaque especial para o sudeste do Estado de MT e norte de RR. O aumento na duração das ondas de calor fica mais evidente a partir dos anos 2000 nas três regiões da ALB (Figura 4.5f).

Por fim, em relação aos eventos de ondas de calor (WSFI; Figura 4.5g), nota-se que o comportamento do indicador é bastante homogêneo espacialmente em praticamente toda a ALB, que sofre com uma média de 4 a 6 eventos/ano. A exceção é no setor noroeste, que experimenta uma média de 2 a 4 eventos/ano. É interessante notar que, no extremo leste, onde a climatologia é de 6 ondas de calor por ano, o WSDI indica uma média de 40 a 50 dias no ano com temperaturas máximas acima do percentil 90. As tendências (Figura 4.5h) apontam para um aumento significativo de +1 evento/década em quase toda a ALB, com exceção do estado de RR e algumas áreas do PA, onde esse aumento pode alcançar 1,5 eventos/década. Assim como o WSDI e SU35, nota-se um aumento pronunciado na frequência das ondas de calor a partir da década de 1990 (Figura 4.5i), principalmente no S da ALB.

4.1.2 Indicadores de Precipitação

Nas Figuras 4.6 e 4.7 e 4.8 são apresentadas as climatologias anuais e as tendências observadas dos indicadores de precipitação. Nas figuras também são exibidas as séries temporais anuais desses indicadores para cada setor da ALB: NO, N e S. As climatologias são calculadas para o período de 1991 a 2020, totalizando 30 anos de dados, enquanto as tendências decadais e as séries temporais são calculadas para o período de 1961 a 2021, totalizando 62 anos de dados. Na Figura 4.6, são apresentadas as climatologias e as tendências dos indicadores PRCPTOT e R95p, ou seja, índices associados à intensidade da precipitação. A Tabela 4.2 apresenta as tendências dos extremos de precipitação computados para as regiões NO, NE e S.

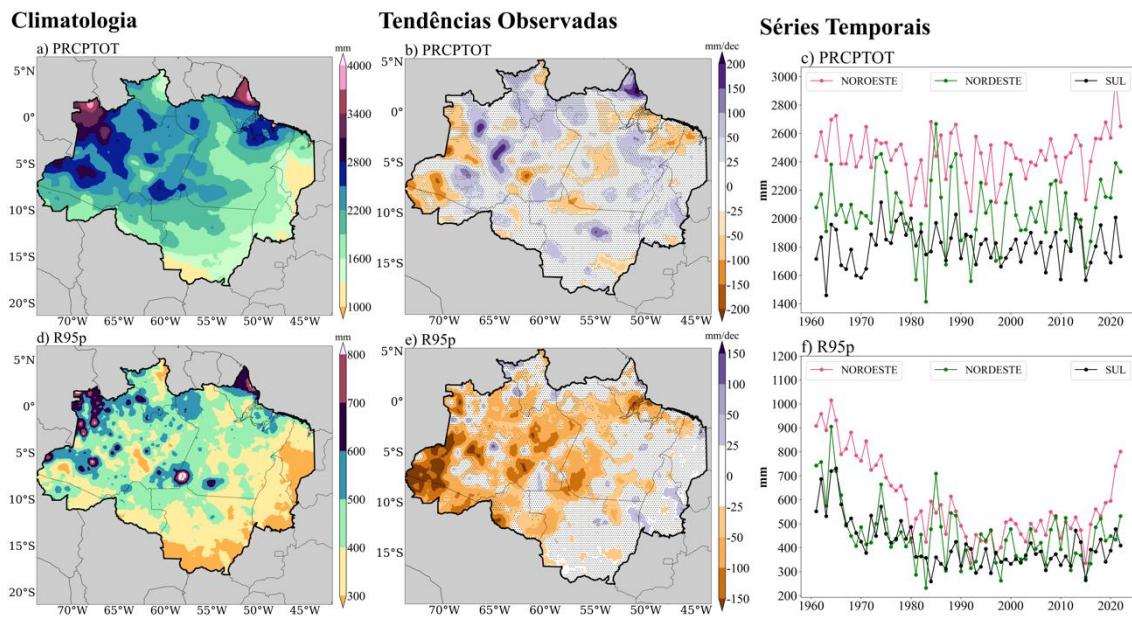


Figura 4.6 Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências em mm/década (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) PRCPTOT, e (d), (e) e (f) R95p. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Tabela 4.2 Magnitudes das tendências dos indicadores de extremos climáticos associados à precipitação no período 1961-2021, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Valores em negrito denotam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Indicadores	NO	NE	S	Unidade
PRCPTOT	+3,0	-0,7	-4,0	mm/déc.
R95p	-62,3	-23,5	-27,3	mm/déc.
RX5day	-2,6	-1,4	-2,3	mm/déc.
SDII	-0,3	-0,1	-0,1	mm/déc.
R30mm	-1,2	-0,4	-0,4	Dias/déc.
CDD	-0,4	+0,1	+1,8	Dias/déc.
CWD	+3,2	+2,2	+1,0	Dias/déc.

Em relação ao PRCPTOT (Figura 4.6a), observa-se que os maiores totais pluviométricos são registrados no noroeste da ALB e no AP, ultrapassando os 3000 mm/ano, enquanto na porção leste e sul, os acumulados são inferiores a 2000 mm/ano. Essa diferença espacial é destacada pela sazonalidade da precipitação. O Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) começa no noroeste do país com as primeiras atividades convectivas entre final do inverno e início da primavera e se estende até o sudeste, mas os maiores totais são registrados no setor norte (REBOITA et al., 2010).

Além disso, no norte do PA e no AP, os totais pluviométricos também são altos devido à influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua migração latitudinal durante o final do verão e início do outono (REBOITA et al., 2010) e suas instabilidades associadas, especialmente as linhas de instabilidade costeiras (COHEN et al., 1989; OLIVEIRA & OYAMA, 2015; SOUSA et al., 2021). Nesses dois estados, a tendência do indicador (Figura 4.6b) aponta para um aumento significativo de +200 mm/década. A direção da tendência não é uniforme em toda a ALB. No estado do AC e no leste do estado do AM, observa-se uma redução superior a -100 mm/década, enquanto na porção central do AM, há uma tendência de maiores totais pluviométricos anuais, com aumento superior a +100 mm/década. Contudo, ao se analisar as séries temporais mediadas nas três regiões da ALB (NO, NE e S), nota-se que não há tendências estatisticamente significativas de PRCPTOT (Figura 4.6c e Tabela 4.2).

O indicador R95p (Figura 4.6d) segue aproximadamente o mesmo padrão, indicando que os totais pluviométricos associados aos eventos mais intensos de chuva ocorrem no oeste da ALB e no norte do AP, regiões com maiores valores de PRCPTOT. Nesse caso, os maiores acumulados durante eventos mais intensos são observados na porção central, oeste e norte da ALB. A chuva forte na porção central da ALB é causada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), outro sistema característico do SMAS (CARVALHO et al., 2002; MARENGO et al., 2010). Em alguns pontos nessas regiões, a chuva acumulada desses eventos, é superior a 800 mm/ano, ou seja, quase um terço do total pluviométrico anual. Muitos estudos apontam que a variabilidade desses eventos extremos de chuva está ligada às variações na TSM da região tropical dos Oceanos Pacífico e Atlântico (MARENGO e ESPINOZA 2016; BUILES-JARAMILLO et al. 2018; ARAGÃO et al. 2018; entre outros). Apesar da semelhança com o PRCPTOT no campo da climatologia, a direção da tendência do indicador R95p é mais uniforme espacialmente. Essa discrepância se reflete na predominância do sinal de redução do acumulado anual dos eventos de chuva intensa na região de estudo. A magnitude dessa tendência é mais acentuada na porção centro-oeste da ALB, com algumas áreas ultrapassando os -150 mm/década, região onde a intensidade dos eventos extremos de chuva é maior. De fato, a evolução temporal de R95p mediada nas três regiões da ALB mostra uma queda acentuada no decorrer das últimas décadas (Figura 4.6f), especialmente na região NO, onde a taxa média de decréscimo é de -62,3 mm/década (Tabela 4.2). A alta frequência de eventos El Niño desde os anos 1990 pode estar

relacionada com a redução nas chuvas intensas sobre esta parte da Amazônia (Shimizu et al., 2017). Nos setores leste e sudeste da área de estudo, observa-se que algumas localidades apresentam uma tendência sutil de aumento, inferior a +25 mm/década.

Na Figura 4.7, são apresentadas as climatologias e as tendências dos indicadores RX5day e SDII, que também são índices atrelados à intensidade da precipitação. No indicador RX5day (Figura 4.7a), associado à máxima precipitação em 5 dias consecutivos, observa-se um comportamento mais homogêneo espacialmente em quase toda a ALB, com acumulados que chegam a atingir 140 mm/5 dias. A única diferença significativa é ao norte do AP, onde esse indicador supera os 200 mm/5 dias em função da ZCIT. De maneira semelhante ao indicador de chuvas intensas, também é evidente uma tendência significativa de redução na precipitação acumulada em 5 dias consecutivos no setor oeste da ALB (Figura 4.7b). A magnitude do sinal é mais expressiva no AC, no setor sudoeste do AM, no extremo sul de RO, no norte do PA e no sul do AP, ultrapassando -15 mm/década. Dessa forma, a tendência medida na região NE não apresenta significância estatística (Figura 4.7c e Tabela 4.2).

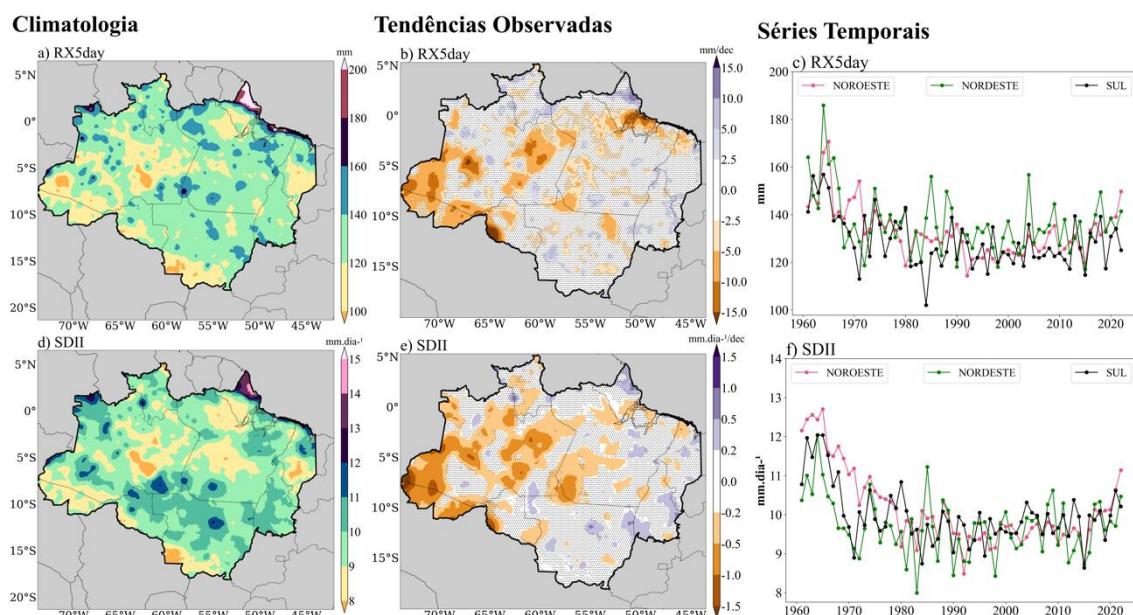


Figura 4.7. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) RX5day, e (d), (e) e (f) SDII. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

O campo médio da intensidade da precipitação diária medida pelo indicador SDII (Figura 4.7d) apresenta uma distribuição espacial semelhante ao indicador R95p, com valores maiores na porção central e oeste da ALB, além do extremo norte. Nessas regiões,

o valor médio do SDII está em torno de 10 a 12 mm/dia, sendo um pouco maior ao norte do AP (> 14 mm/dia). No geral, os valores de ambos os indicadores são maiores nas bordas nordeste e noroeste da ALB, regiões identificadas como áreas de hotspot (ESPINOZA et al. 2015; CHAVEZ e TAKAHASHI 2017), que são áreas geográficas que apresentam uma alta concentração de diversidade biológica e que estão sob ameaça significativa de extinção de espécies e degradação ambiental (SHERBININ, 2014). Semelhante aos indicadores R95p e RX5day, o SDII também exibe uma tendência de redução significativa na porção centro-oeste da ALB (Figura 4.7e), superior a -1 mm/dia por década em algumas localidades. Através da análise do balanço hídrico na Amazônia e da simulação do desmatamento e dos processos da superfície terrestre na ALB, nota-se que esses elementos desempenham um papel importante na redução de SDII no oeste da região (LLOPART et al., 2018). Na região NE da ALB, o sinal de SDII é bastante variado e não há significância estatística na evolução temporal (Figura 4.7f); apresentando magnitude média de somente -0,1 mm/dia por década (Tabela 4.2).

Por fim, na Figura 4.8 são apresentadas as climatologias e as tendências observadas dos indicadores de extremos climáticos relacionados à frequência e duração dos eventos de precipitação e seca: R30mm, CDD e CWD. No caso da climatologia do indicador R30mm (Figura 4.8a), que exibe a frequência de eventos de chuva forte (superior a 30 mm/dia), os maiores valores são encontrados em alguns pontos da porção central e noroeste da ALB, e no norte do AP (> 26 dias), enquanto nos setores leste e sudeste, os valores do indicador são inferiores a 10 dias. A tendência desse indicador é negativa na porção centro-oeste (Figura 4.8b), indicando uma redução significativa dos eventos de precipitação com acumulados diárias superiores a 30 mm. A magnitude dessa redução se estabelece por volta de -3 dias/década, sendo bem marcante em todas as áreas da ALB (Figura 4.8c). A heterogeneidade espacial local de tendências provavelmente acontece porque a floresta tem importante papel na manutenção das chuvas locais e regionais, contribuindo para o ciclo hidrológico por meio da reciclagem e transporte de umidade dentro e fora da região, dependendo do uso do solo em cada área (AGUIAR et al., 2016).

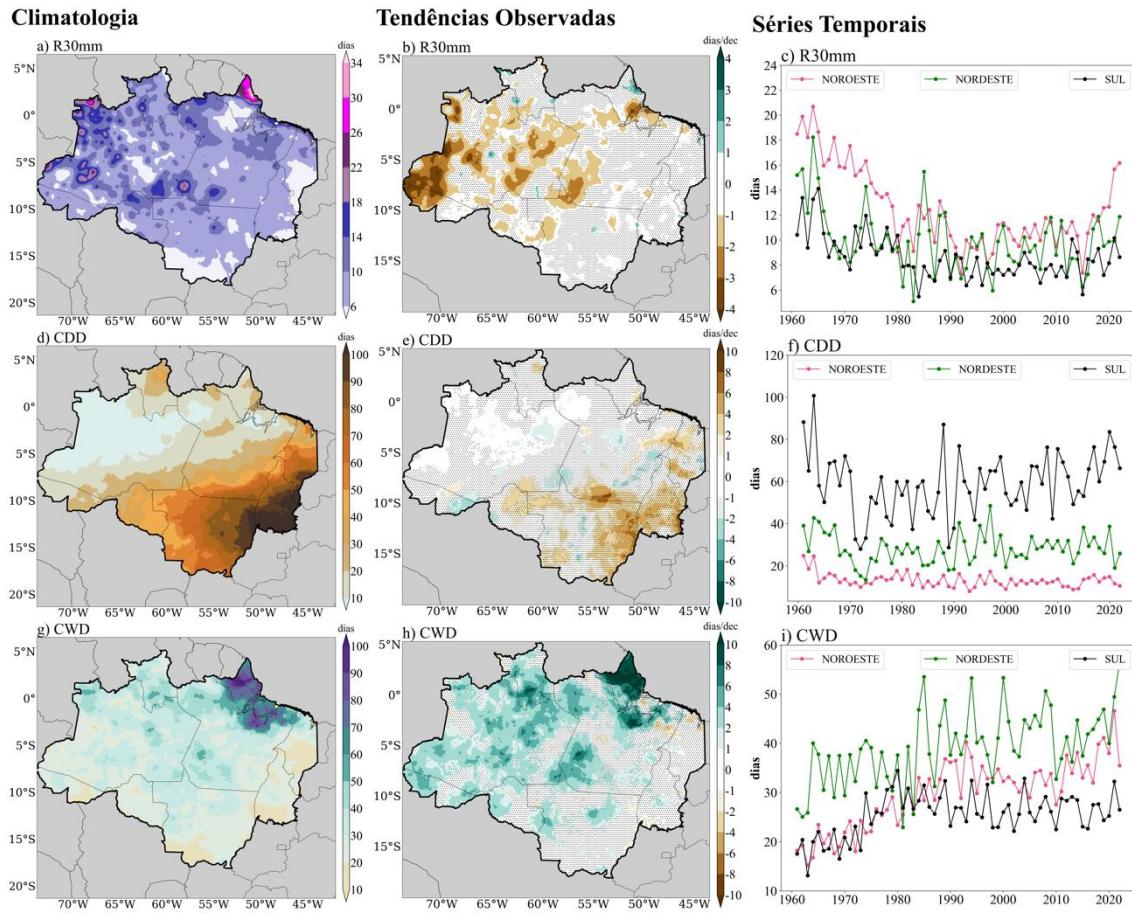


Figura 4.8. Climatologia (à esquerda) para o período 1991-2020, tendências (centro) e séries temporais calculadas nas regiões NO, NE e S da ALB (à direita) para o período 1961-2021 dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a), (b) e (c) R30mm, (d), (e) e (f) CDD, e (g), (h) e (i) CWD. Nas tendências observadas, áreas sem pontilhado representam tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%.

Em relação ao comportamento médio da maior duração consecutiva dos períodos de seca (CDD; Figura 4.8d), é evidente que o sul e o leste da ALB são as regiões mais secas, onde o CDD é mais elevado. Em média, o setor leste do MT e o centro-sul do TO experimentam mais de 100 dias consecutivos sem chuva no ano, indicando que o período de estiagem é mais longo, geralmente entre Maio e Setembro (ALVARES et al., 2013; REIS et al., 2020). Nessa mesma região, há uma tendência significativa de aumento dos dias secos consecutivos (Figura 4.8e), especialmente no estado do TO e no setor leste do estado do MT, onde a magnitude da tendência é superior a +4 dias/década. Essa tendência de aumento do CDD na porção leste da ALB também foi identificada por Silva et al. (2019) e Luiz-Silva et al. (2022). Já no norte e oeste da ALB, a média do CDD é inferior a 20 dias, onde a termodinâmica local contribui para precipitações mais frequentes (LUIZ-SILVA et al., 2021). Na região S da ALB, CDD apresentou aumento a partir da década de 1980, passando de 60 dias nos anos 1970 para 70 dias nos anos 2010 (Figura

4.8f). A taxa média de crescimento de CDD é de +1,8 dia/década nessa região (Tabela 4.2), mas sem significância estatística. Desse modo, análises recentes da distribuição da cobertura arbórea nessa área mostram uma mudança nas condições climáticas que poderia causar transições críticas de um ecossistema de floresta para um ecossistema de savana (STAAL et al. 2015). Já em áreas isoladas do setor oeste-noroeste, nota-se uma tendência de redução do indicador CDD, embora em menor magnitude e inferior a -2 dias/década.

O CWD (Figura 4.8g) revela essa característica marcante do período de estiagem na ALB, uma vez que na porção leste, a média é de menos de 20 dias consecutivos de chuva por ano, enquanto na porção centro-norte, os valores do indicador são superiores a 40 dias. No norte do PA e no estado do AP, o valor médio do CWD é superior a 80 dias, alinhado ao que foi observado nos resultados de outros indicadores para essa mesma região. Nessa região, também é observado uma tendência de aumento do indicador (Figura 4.8h), onde os valores ultrapassam os +10 dias/década. Se os dias úmidos consecutivos aumentam no setor oeste da ALB, mesmo com a redução de índices extremos de precipitação, isso pode ser um indicativo de uma maior frequência de chuvas com menor intensidade na região. É possível observar essa tendência de redução do CDD na porção oeste nas tendências observadas do indicador CWD (Figura 4.8h), onde se verifica uma tendência significativa de aumento dos dias úmidos consecutivos, superior a 2 dias/década nessa mesma região, ou seja, em todo o centro-oeste e norte da ALB. O estudo de Haghtalab et al. (2020) também identificou que o setor oeste da ALB tem se tornado mais úmido desde o início da década de 1980, alinhado ao que se observa na Figura 4.8i nos setores Noroeste e Nordeste da ALB. Se os dias úmidos consecutivos aumentam na região NO da ALB (Figura 4.8i), mesmo com a redução na intensidade dos indicadores de extremos de precipitação (R95p, RX5day e SDII), isso pode ser um indicativo de que as chuvas estão mais bem distribuídas, ocorrendo com menor intensidade na região.

4.1.3 Síntese da Climatologia e Tendências dos Extremos Climáticos

A climatologia dos indicadores de extremos de temperatura exibe uma diferenciação entre as porções norte/sul e leste/oeste da região. No campo das menores temperaturas mínimas (TNn), assim como no campo das médias das temperaturas

mínimas (TMINmean), observa-se um forte gradiente norte/sul. Com a penetração de massas de ar frio no sul da ALB, TNn pode chegar a 10°C no sul, aumentando em direção ao norte, podendo atingir 20°C na porção norte da ALB, onde em raras ocasiões observa-se a chegada de sistemas frontais (MARENGO et al. 1997). No caso das maiores máximas (TXx) e das médias das temperaturas máximas (TMAXmean) ocorre o oposto, os maiores valores são observados no sul/sudeste da ALB, onde TXx atinge 40°C e os menores valores, 34°C, no norte da ALB. Isso ocorre, pois a temperatura máxima sofre forte influência da nebulosidade. Como o norte da ALB fica nublado na maior parte do ano, a TX nessa área não se eleva tanto quanto no sul. Os valores mais elevados de TX no sul da ALB ocorrem durante o período seco (primavera). Esse mesmo padrão se repete no campo de SU35, com máximo de 100 dias com TX>35°C no sul/sudeste e apenas 20 a 30 dias no norte da ALB. O campo de WSDI também exibe valores mais elevados no leste da ALB (ondas de calor que se prolongam por 40 dias) e menores valores no oeste (ondas de calor de no máximo 10 dias), novamente influenciados pela maior nebulosidade que existe no oeste da ALB.

As tendências observadas nos extremos de temperatura indicam um aquecimento significativo em toda a área de estudo. Nos campos médios, a magnitude da tendência é maior para TMINmean em comparação a TMAXmean. Além disso, o aquecimento é superior a +0,6°C no setor leste da ALB, contrastando com outros estudos que apontavam o sudeste da região como a porção mais afetada (ALMEIDA et al., 2017; MARENGO et al., 2018; LUIZ-SILVA et al., 2022). Na porção central e leste da ALB, nota-se uma redução significativa da DTR, resultado encontrado também por Regoto et al (2021). Esse padrão é coerente, pois as temperaturas mínimas apresentam uma tendência de aumento superior ao que se observa para as temperaturas máximas, o que se traduz na redução do DTR. Quanto aos indicadores de extremos, TNx e TNn, a magnitude do aumento foi maior no setor leste, sendo este sinal superior a +0,8°C/década, diferentemente do estudo de Silva et al. (2019), que observou esse aumento na porção oeste. Silva et al. (2019) também identificaram um aumento substancial dos indicadores TX90p e TN90p na porção leste. Neste estudo, as tendências encontradas nesses indicadores apontaram um aumento mais pronunciado no norte e noroeste, semelhante aos resultados encontrados em trabalhos mais recentes (AVILA-DIAZ et al., 2020; COLLAZO, BARRUCAND e RUSTICUCCI, 2022).

Nota-se uma tendência significativa e acentuada de redução das noites frias (TN10p) na porção leste da ALB. O trabalho de Avila-Diaz et al. (2020) também encontrou esse sinal mais acentuado de TN10p utilizando a mesma base de dados de Xavier et al. (2015, 2017), porém com uma série mais curta (1980-2016). No caso da duração das ondas de calor (WSDI), o aumento mais pronunciado foi identificado nos extremos norte e sul da ALB, semelhante aos resultados encontrados por Collazo, Barrucand e Rusticucci (2022), que mostram esse aumento também no setor norte.

Com relação aos indicadores de precipitação, observa-se em geral uma variação leste/oeste, com clima mais seco no leste e mais úmido no oeste da ALB. Esse padrão pode ser apreciado em PRCPTOT, com totais anuais variando entre 1300 e 3700 mm e, também no indicador CDD, que exibe máximo de 100 dias/ano sem chuvas no leste e mínimo de 10 dias sem chuvas no oeste da ALB. Da mesma forma, a frequência de dias com precipitação superior a 30 mm (R30mm) também é menor no leste (em torno de 6-10 dias) do que no oeste (14-18 dias). Os demais indicadores (R95p, RX5day, SDII e R30mm) apesar de apresentarem em geral um padrão mais seco no leste do que no oeste, exibem diversos núcleos de máximos e mínimos, provavelmente refletindo a baixa qualidade da interpolação, gerada pela carência de dados na região. O CWD, no entanto, exibe uma diferenciação no sentido norte-sul, com os maiores valores ao norte da região, principalmente próximo à costa, no AP e norte do PA. Esse comportamento está atrelado à advecção de umidade do Atlântico e à evapotranspiração da floresta Amazônica, que fornecem suporte de umidade para as linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa durante o ano.

No caso da tendência dos indicadores de extremos de precipitação, a direção não é uniforme e significativa como nos indicadores de temperatura. Os sinais mais significativos de aumento e redução da precipitação se apresentam na porção oeste e norte da ALB. No norte do AP e na região central do AM, há uma tendência de aumento de +200 mm/década, enquanto no oeste do AM e no AC, há uma tendência de redução em menor proporção (inferior a -100 mm/década), alinhada ao estudo de Medeiros et al. (2022). No entanto, nos indicadores R95p, RX5day e SDII, nota-se uma tendência significativa de redução em todo o centro-oeste da ALB. A frequência das chuvas com acumulados superiores a 30 mm (R30mm) também segue o mesmo sinal para a mesma região. Silva et al. (2019) verificaram um aumento significativo desses indicadores na porção leste, o que não foi observado no presente estudo.

Em relação aos dias secos, há uma tendência significativa de aumento na porção leste-sudeste, como já identificado em outros estudos (SILVA et al., 2019; AVILA-DIAZ et al., 2020; LUIZ-SILVA et al., 2022). No indicador CWD, nota-se uma tendência de aumento na porção centro-oeste da ALB. O oeste da ALB tem se tornado mais úmido desde o início da década de 1980 (HAGHTALAB et al., 2020). Sendo assim, o paradigma “seco torna-se mais seco e úmido torna-se mais úmido” (*dry gets drier, wet gets wetter*; GREVE et al., 2014), amplamente utilizado para resumir os impactos nas tendências regionais da umidade/eventos de seca, parece ser válido também na ALB.

Analizando em conjunto os resultados encontrados para as tendências dos indicadores de extremos de temperatura do ar e de precipitação nas três subregiões da ALB (Tabelas 4.1 e 4.2) observa-se que as maiores taxas de aquecimento são observadas no NE, onde os aumentos relacionados à intensidade da temperatura mínima (TMINmean, TNx, TNn) e às suas frequências, quer seja, redução das noites frias (TN10p) ou aumento das noites quentes (TN90p) apresentam taxas superiores às demais regiões. No NO ocorrem as maiores taxas de redução da intensidade da precipitação intensa (R95p, RX5day, SDII) e de sua frequência de ocorrência (R30mm), além de ser a única região apresentando aumento estatisticamente significativo de CDD. Por outro lado, no S ocorrem as menores taxas de aquecimento, exceto para TXx que é superior às outras duas regiões e também para SU35 que é bastante elevada (+8 dias/década). A precipitação intensa também é reduzida no NE e no S, mas com uma intensidade menor do que no NO. Concluindo, as três regiões estão se tornando mais quentes e apresentando redução na intensidade e na frequência das chuvas intensas.

As principais tendências detectadas na ALB estão resumidas na Figura 4.9, onde destacam-se o maior aquecimento no NE e menor no S, a redução das chuvas intensas, com maior (menor) intensidade no NO (S) e aumento de CDD apenas no NO.

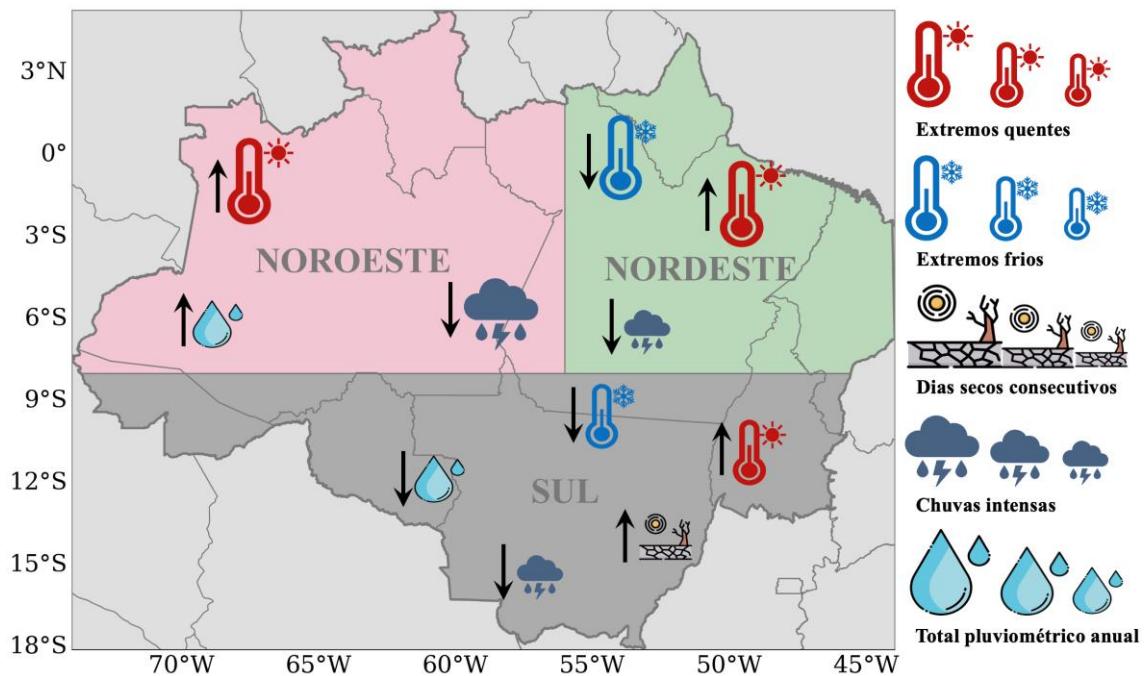


Figura 4.9. Resumo do comportamento das tendências dos extremos de temperatura do ar e de precipitação identificadas nas últimas décadas. Os tamanhos dos símbolos (pequeno, médio e grande) e sua localização no mapa são usados para destacar respectivamente a magnitude relativa entre as três regiões (NO, NE e S) e o local predominante onde essa tendência foi detectada dentro de cada região. As setas para cima (baixo) indicam aumento (redução) da tendência observada.

4.2 Projeções dos Extremos Climáticos sobre a ALB

Nesta seção são apresentadas as projeções de alguns indicadores de extremos climáticos para o período 2041-2060 e 2081-2100 sob o cenário SSP5-8.5.

4.2.1 Indicadores de Temperatura

Na Figura 4.10 são apresentadas as mudanças dos indicadores TMAXmean, TMINmean e DTR para o médio (2041–2060) e longo (2081–2100) prazos sob o cenário SSP5-8.5 em relação ao clima presente (1995-2014) dos modelos. No médio prazo, projeta-se um aumento uniforme e significativo de TMAXmean e TMINmean (Figura 4.10a e c) entre 2 e 3°C em toda a ALB, exceto no extremo nordeste da região, onde esse valor fica entre 1 e 2°C. Na Tabela 4.3, nota-se que o aumento projetado em TMAXmean é ligeiramente maior comparado ao TMINmean. Por esse motivo, a mudança projetada na amplitude térmica (DTR; Figura 4.10e) é positiva mas pequena, em torno de +0,4°C em toda a região (Tabela 4.3), sendo significativa apenas na porção centro-oeste da ALB. Apesar disso, os modelos concordam quanto ao sinal da mudança projetada em toda a região de estudo, com exceção de algumas áreas do estado do MA e extremo nordeste do

PA. No trabalho de Avila-Diaz et al. (2020), as mudanças mais acentuadas desse indicador são observadas no setor sul da ALB para o meio do século (2046-2065).

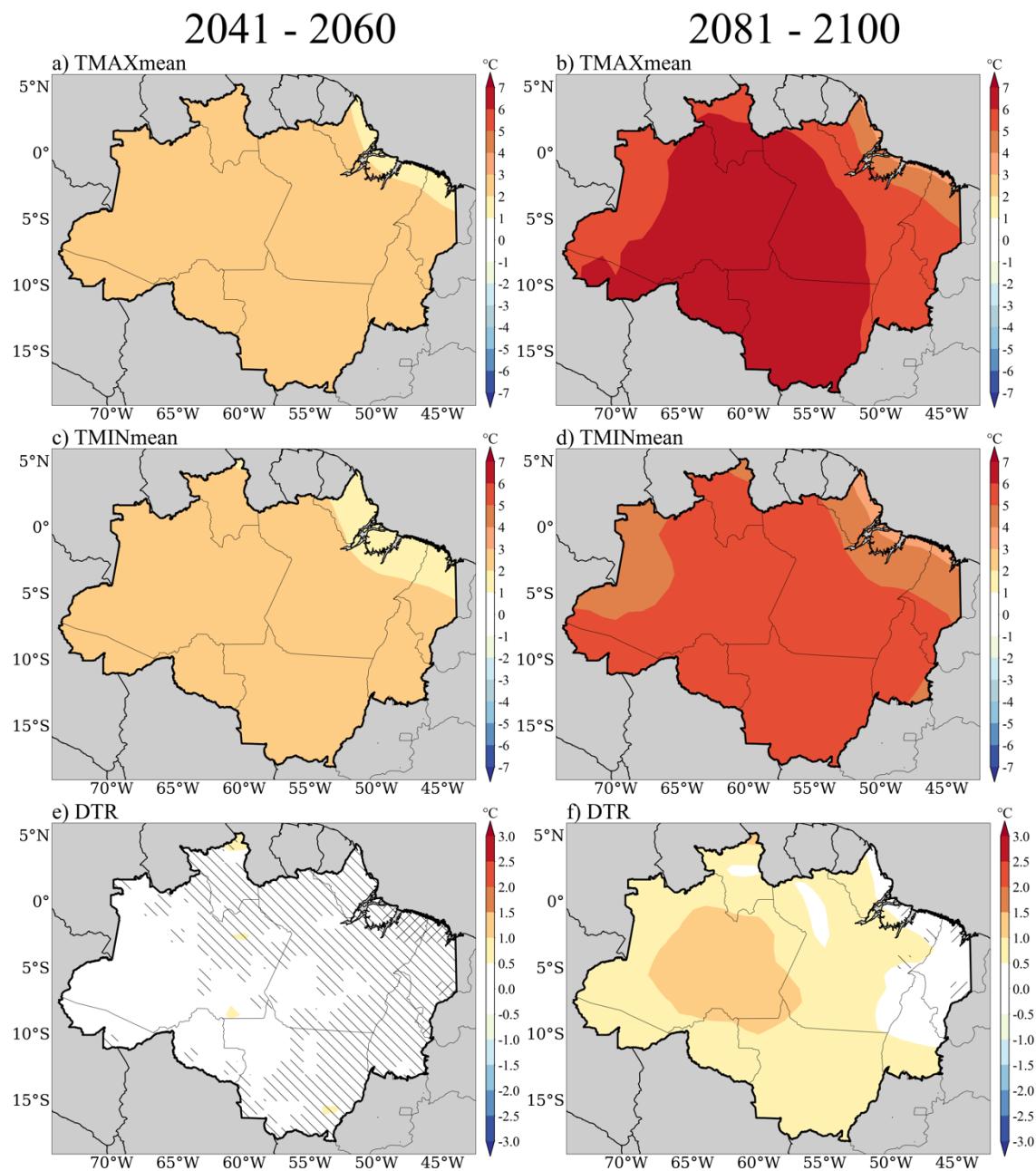


Figura 4.10 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TMAXmean (°C) , (c) e (d) TMINmean (°C), e (e) e (f) DTR (°C). Áreas não hachuradas indicam mudanças robustas (mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% e onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança). Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa. Linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.3 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TMAXmean, TMINmean e DTR, considerando as regiões NO, NE e S da ALB. Os valores médios dos indicadores no clima futuro sob cenário SSP5-8.5 correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

TMAXmean (°C)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	32,1	34,7 (+ 2,6)	38,3 (+ 6,2)
NE	31,9	34,3 (+ 2,4)	37,5 (+ 5,6)
S	32,3	35 (+ 2,7)	38,5 (+ 6,2)

TMINmean (°C)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	22,4	24,6 (+ 2,2)	27,7 (+ 5,3)
NE	22,4	24,5 (+ 2,1)	27,4 (+ 5,0)
S	20,6	22,9 (+ 2,3)	26,0 (+ 5,4)

DTR (°C)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	9,7	10,1 (+ 0,4)	10,6 (+ 0,9)
NE	9,5	9,8 (+ 0,3)	10,0 (+ 0,5)
S	11,7	12,1 (+ 0,4)	12,4 (+ 0,7)

No final do século, as mudanças projetadas praticamente dobram em magnitude, de modo que quase toda a ALB experimentará um aumento entre 5 e 6°C em TMAXmean e TMINmean (Figura 4.10b e d, respectivamente). Na Tabela 4.3, é evidente que as mudanças mais acentuadas desses indicadores são projetadas para o NO e S da ALB. Outros estudos que utilizaram como referência o cenário RCP8.5, também verificaram um aumento da temperatura média do ar em torno dessa magnitude para o final do século (VEIGA et al., 2023). Ademais, o aumento projetado em TMAXmean fica entre 6 e 7°C nas porções NO e S, o que se traduz em temperaturas máximas em torno dos 38°C no final do século em ambas as subregiões da ALB (Tabela 4.3). No extremo nordeste da região, esse aumento em TMAXmean e TMINmean é menor em magnitude, semelhante ao padrão projetado para o médio prazo. A amplitude térmica responde a esse aumento mais expressivo de TMAXmean em relação a TMINmean, isso porque as mudanças projetadas para o DTR a longo prazo são significativas e superiores a +0,5°C em algumas áreas da ALB, com exceção do setor leste. O aumento mais acentuado na amplitude

térmica diária é projetado para o estado do AM, que engloba o setor NO da ALB, indicando um aumento de em média 0,9°C nessa região (Figura 4.10f).

Na Figura 4.11 são apresentadas as mudanças projetadas nos indicadores TXx e TXn, que representam as maiores e menores temperaturas máximas, respectivamente. Novamente os indicadores apontam para um aquecimento significativo em toda a ALB, com destaque para a porção central e os setores sul e oeste, região onde as projeções indicam um aumento mais pronunciado desses indicadores. Esse comportamento também foi verificado no trabalho de Avila-Diaz et al. (2020) utilizando o cenário RCP8.5. No médio prazo (Figura 4.11a e c), esse incremento pode alcançar 4°C (3°C) para TXx (TXn). Na Tabela 4.4, verifica-se que no S, esse aquecimento é mais acentuado comparado as demais regiões, principalmente em TXx que apresenta um incremento de 3,7°C, indicando que as maiores temperaturas máximas poderão ultrapassar os 40°C no médio prazo. No que se refere ao TXn, a mudança projetada para 2041-2060 é robusta em toda a ALB, com exceção de uma pequena área no extremo sul do MT, onde não há significância estatística.

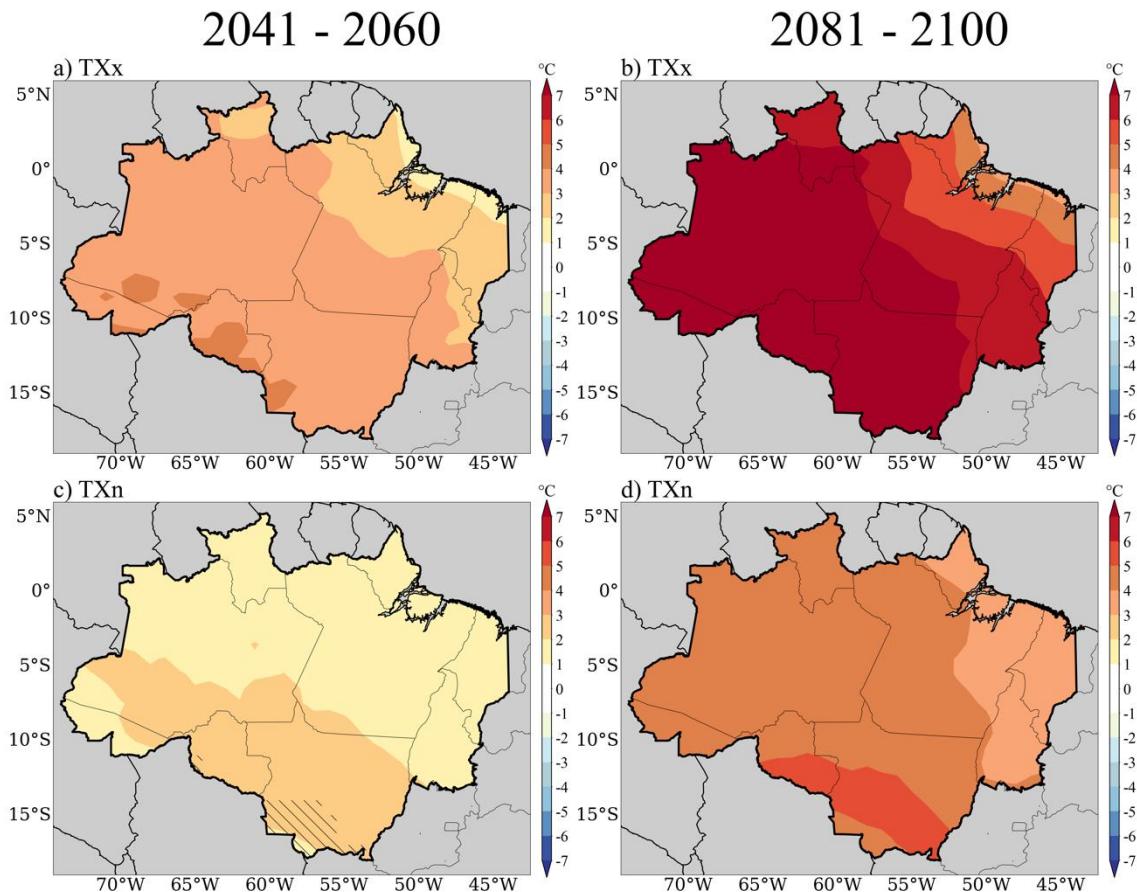


Figura 4.11 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TXx, e (c) e (d) TXn, sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.4 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TXx (°C) e TXn (°C) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

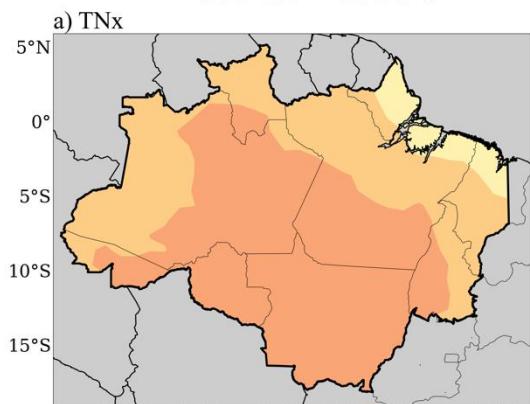
TXx (°C)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	36,2	39,7 (+ 3,5)	44,0 (+ 7,8)
NE	35,5	38,2 (+ 2,7)	41,2 (+ 5,7)
S	37,7	41,4 (+ 3,7)	45,3 (+ 7,6)

TXn (°C)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	25,7	27,6 (+ 1,9)	30,0 (+ 4,3)
NE	26,2	27,9 (+ 1,7)	30,1 (+ 3,9)
S	23,4	25,5 (+ 2,1)	28,0 (+ 4,6)

No longo prazo, destaca-se a amplitude da mudança em TXx (Figura 4.11b), que indica um incremento entre 7 e 8°C em aproximadamente toda a ALB, com exceção do setor nordeste, onde a magnitude diminui gradativamente com a proximidade da costa. Na Tabela 4.4, constata-se um aumento de 7,8°C e 7,6°C nas porções NO e S, respectivamente, enquanto no NE, esse incremento de temperatura é menor comparado as demais regiões (5,7°C). Esse aumento pronunciado da temperatura projetado para o indicador TXx também foi verificado no trabalho de Li et al. (2021). No que se refere ao TXn (Figura 4.11 d), esse aumento fica entre 4 e 5°C em praticamente toda a ALB, com exceção do setor leste, que varia entre 3 e 4°C, e no extremo sul, onde em algumas áreas dos estados do MT e RO o aumento oscila entre 5 e 6°C. O aumento da temperatura máxima provavelmente estará relacionado com o aumento da frequência de eventos El Niño, geralmente associados com redução na precipitação e aumento na temperatura em grande parte da Amazônia (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; COSTA et al., 2022).

De maneira análoga a Figura 4.11, na Figura 4.12 são apresentadas as mudanças projetadas, mas para os extremos de temperatura mínima (TNx e TNn). No médio prazo (Figura 4.12a e c), a magnitude das mudanças projetadas é mais homogênea espacialmente para ambos os indicadores, com diferenças somente na magnitude. Projeta-se um aumento significativo entre 3 e 4°C (entre 2 e 3°C) em TNx (TNn). No longo prazo, no entanto, o aquecimento é bastante heterogêneo espacialmente na ALB e a diferença entre os dois indicadores é mais evidente. No caso do TNx (Figura 4.12b), projeta-se um aumento mais pronunciado que atinge valores entre 7 e 8 °C em grande parte da ALB, com exceção do setor nordeste, que, semelhante ao comportamento de TMINmean (Figura 4.10d), também apresenta uma gradativa redução na magnitude da mudança em direção a região litorânea. Ademais, verifica-se que, novamente, a porção S é a região com o maior incremento de temperatura (7,2°C; Tabela 4.5), o que representa uma maior temperatura mínima média na área de 31°C no final do século. O TNn (Figura 4.12d), por outro lado, apresenta uma diferença norte-sul, de modo que as maiores mudanças são projetadas para o setor sul e as menores para o norte da ALB, especialmente no longo prazo, semelhante ao que foi verificado em outros trabalhos (AVILA-DIAZ et al., 2020; LI et al., 2021). Destaca-se ainda um incremento médio de 5,7°C no S da ALB (Tabela 4.6), possivelmente influenciado por um aumento mais pronunciado na porção centro-leste do MT (Figura 4.12d).

2041 - 2060



2081 - 2100

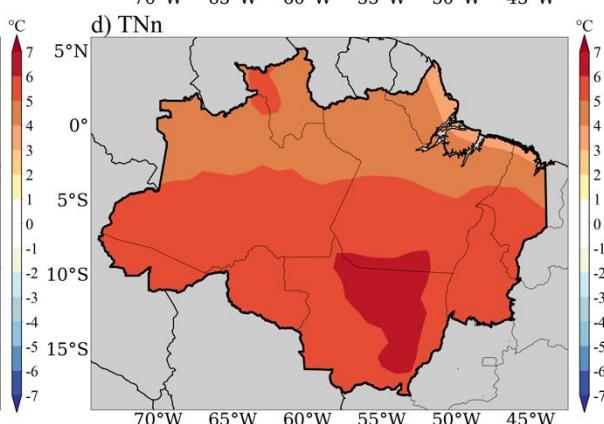
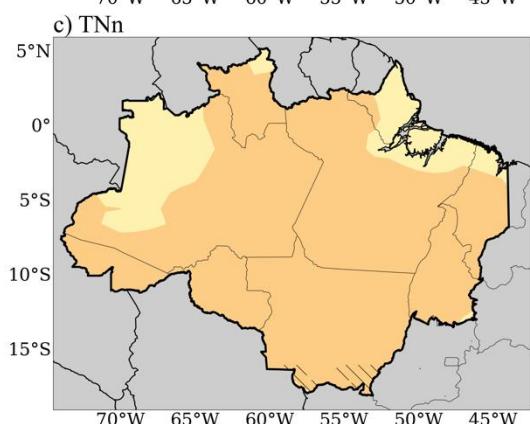
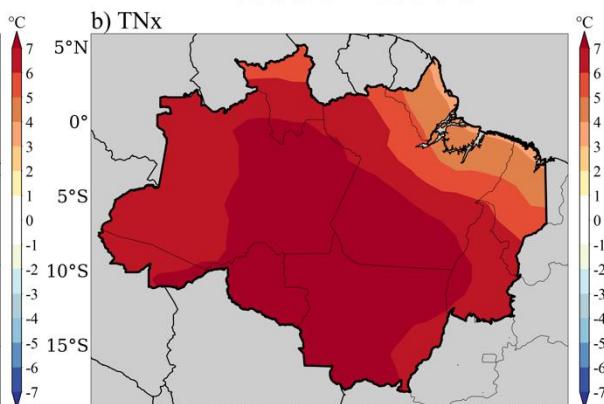


Figura 4.12 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) TNx (°C), e (c) e (d) TNn (°C). Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.5 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos TNx (°C) e TNn (°C) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

TNx (°C)

	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	24,5	27,5 (+ 3,0)	31,3 (+ 6,8)
NE	24,4	26,9 (+ 2,5)	30,1 (+ 5,7)
S	23,9	27,2 (+ 3,3)	31,1 (+ 7,2)

TNn (°C)

	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	18,7	20,8 (+ 2,1)	23,8 (+ 5,1)
NE	19,4	21,5 (+ 2,1)	24,3 (+ 4,9)
S	12,7	15,0 (+ 2,3)	18,4 (+ 5,7)

Por fim, a Figura 4.13 apresenta as mudanças projetadas do indicador SU35. A quantidade de dias no ano com temperatura máxima superior aos 35°C (SU35) aumentará significativamente em toda a ALB, seguindo a tendência de aquecimento projetada corroborada pelos demais indicadores apresentados. No meio do século, a maior parte da ALB poderá experimentar um aumento de até 75 dias no ano com temperaturas máximas elevadas, enquanto outras áreas, como o extremo sul do MT, sul do AM e norte de RR, esse aumento pode chegar a 100 dias. No final do século, os modelos apontam para um aumento de SU35 superior a 125 dias, o que equivale a pouco mais de 1/3 do ano nessa condição. Especialmente no S, esse aumento é superior a 162 dias no ano (Tabela 4.6), o que, no clima futuro equivale a aproximadamente 2/3 do ano (211 dias) com temperaturas bastante elevadas. Alves et al. (2021) mostram que o estresse por calor na Amazônia deve exceder a adaptação humana até o final do século XXI.

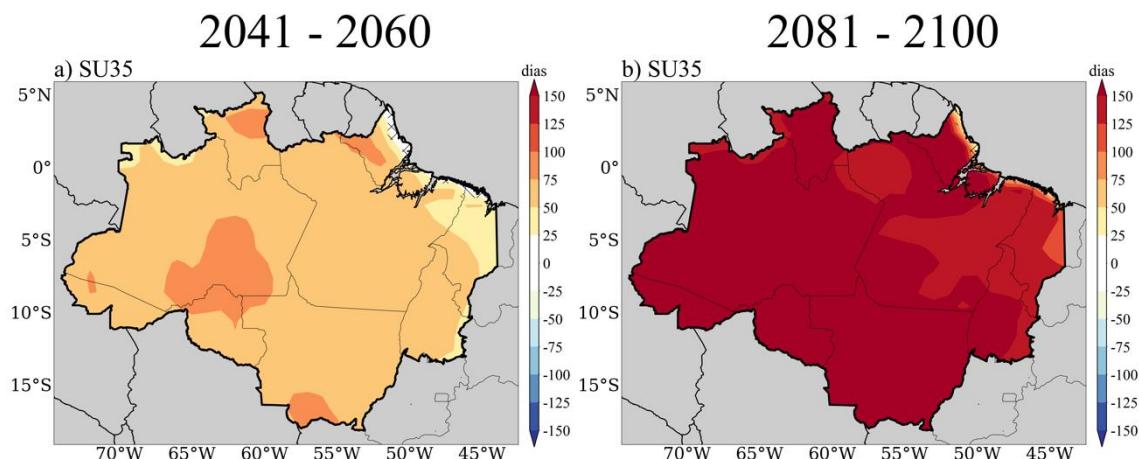


Figura 4.13 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura: (a) e (b) SU35 (dias/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.6 Clima presente e futuro do indicador de extremos climáticos SU35 (dias/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

SU35 (dias no ano)			
	Presente (1991 - 2019)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	22	89 (+ 67)	186 (+ 164)
NE	19	76 (+ 57)	164 (+ 145)
S	49	115 (+ 66)	211 (+ 162)

4.2.2 Indicadores de Precipitação

A Figura 4.14 apresenta as mudanças projetadas dos indicadores PRCPTOT e R95p para o médio e o longo prazo sob o cenário SSP5-8.5. Diferentemente da temperatura, a concordância entre os modelos é menor e as mudanças não são estatisticamente significativas na maior parte da ALB, sobretudo no médio prazo. As projeções para o médio prazo indicam uma redução na precipitação total anual (PRCPTOT; Figura 4.14a) na porção central e norte da ALB, região onde os modelos concordam com o sinal da mudança, apesar de não haver significância estatística. No NO e NE, onde a área de concordância é maior, os modelos projetam uma redução de respectivamente 94 e 103 mm/ano (Tabela 4.7). Esse resultado concorda com Avila-Diaz et al. (2020), apesar de outras pesquisas apontarem para uma redução maior no setor leste (BOISIER et al., 2015; SOUZA et al., 2016; REBOITA et al., 2022). Por outro lado, projeta-se um aumento na magnitude das chuvas mais intensas, entre 75 e 100 mm/ano (R95p; Figura 4.14c) no setor oeste da ALB, onde, na climatologia, os valores médios desse indicador já são mais elevados, alinhado ao valor médio do indicador para o setor NO (Tabela 4.7).

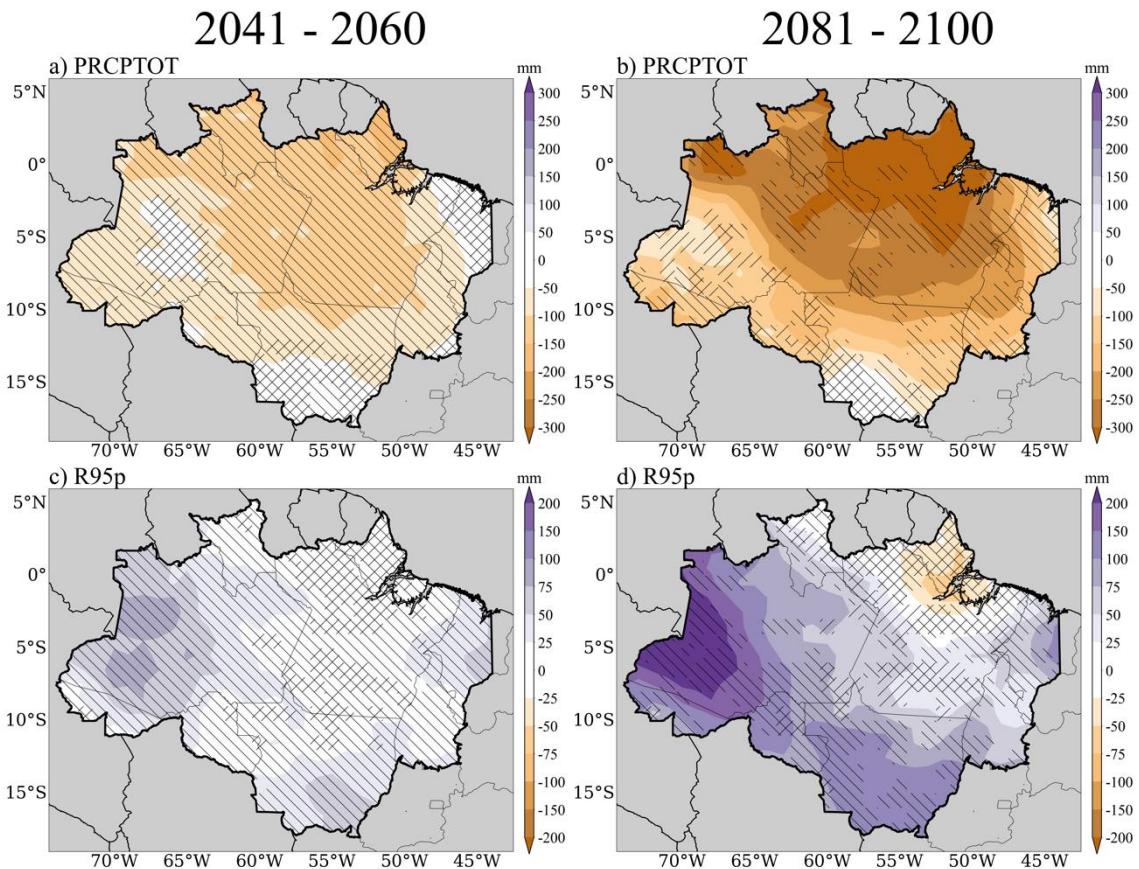


Figura 4.14 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) PRCPTOT (mm/ano), e (c) e (d) R95p (mm/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.7 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos PRCPTOT (mm/ano) e R95p (mm/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

PRCPTOT (mm/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	2415	2321 (-94)	2184 (-231)
NE	2003	1900 (-103)	1732 (-272)
S	1788	1719 (-69)	1643 (-145)

R95p (mm/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	476	518 (+43)	595 (+120)
NE	403	414 (+11)	421 (+19)
S	363	390 (+27)	462 (+98)

A longo prazo, a direção das mudanças projetadas permanece a mesma, porém com um sinal estatisticamente significativo. No caso do PRCPTOT, a diferença entre os setores norte-sul é bem evidente: quanto mais ao norte, maior é a redução no total pluviométrico anual, como verificado na Tabela 4.8. Essa diferenciação também foi observada no trabalho de Veiga et al. (2023). Ao norte do PA e no AP, projeta-se uma redução significativa entre 300 e 350 mm/ano, enquanto no norte do MT, essa redução varia de 50 a 150 mm/ano. No longo prazo, a maior magnitude de redução ainda é no NE. Em contrapartida, os modelos concordam quanto ao aumento do indicador R95p, especialmente no oeste da ALB, onde as mudanças projetadas são maiores em magnitude, apesar de não haver significância estatística. No NO, esse aumento na intensidade das chuvas extremas poderá alcançar em média 120 mm/ano. Algumas áreas no AM, MT e TO apresentam um sinal de mudança estatisticamente significativo e são regiões onde se projeta um aumento de até 150 mm/ano na intensidade dos eventos de chuva forte.

Na Figura 4.15, são apresentadas as mudanças projetadas nos indicadores RX5day e SDII. No médio prazo, não são esperadas mudanças significativas para ambos os indicadores. Apesar da menor magnitude, esses indicadores apresentam a mesma direção da mudança do R95p, ou seja, projeta-se também um aumento no total pluviométrico em 5 dias consecutivos (RX5day; Figura 4.15a) e na intensidade da precipitação diária (SDII; Figura 4.15c) no AM e no centro-sul do MT, regiões onde há concordância entre os

modelos. Mesmo no longo prazo, apenas algumas áreas no AM apresentam um sinal estatisticamente significativo. Na porção NE, a mudança do RX5day é muito pequena, mesmo no final do século (Tabela 4.8). No trabalho de Li et al. (2021) também é projetado um aumento do RX5day em toda a AS, no entanto, o sinal da mudança é estatisticamente significativo no centro-oeste da ALB. Em algumas pequenas áreas do AM, projeta-se um aumento em RX5day (Figura 4.15b) e em SDII (Figura 4.15d), onde a maioria dos modelos concorda com o sinal da mudança. No sul e oeste da ALB, a magnitude da mudança também aumentou em ambos os indicadores, mas sem significância estatística, alinhado ao trabalho de Avila-Diaz et al. (2020).

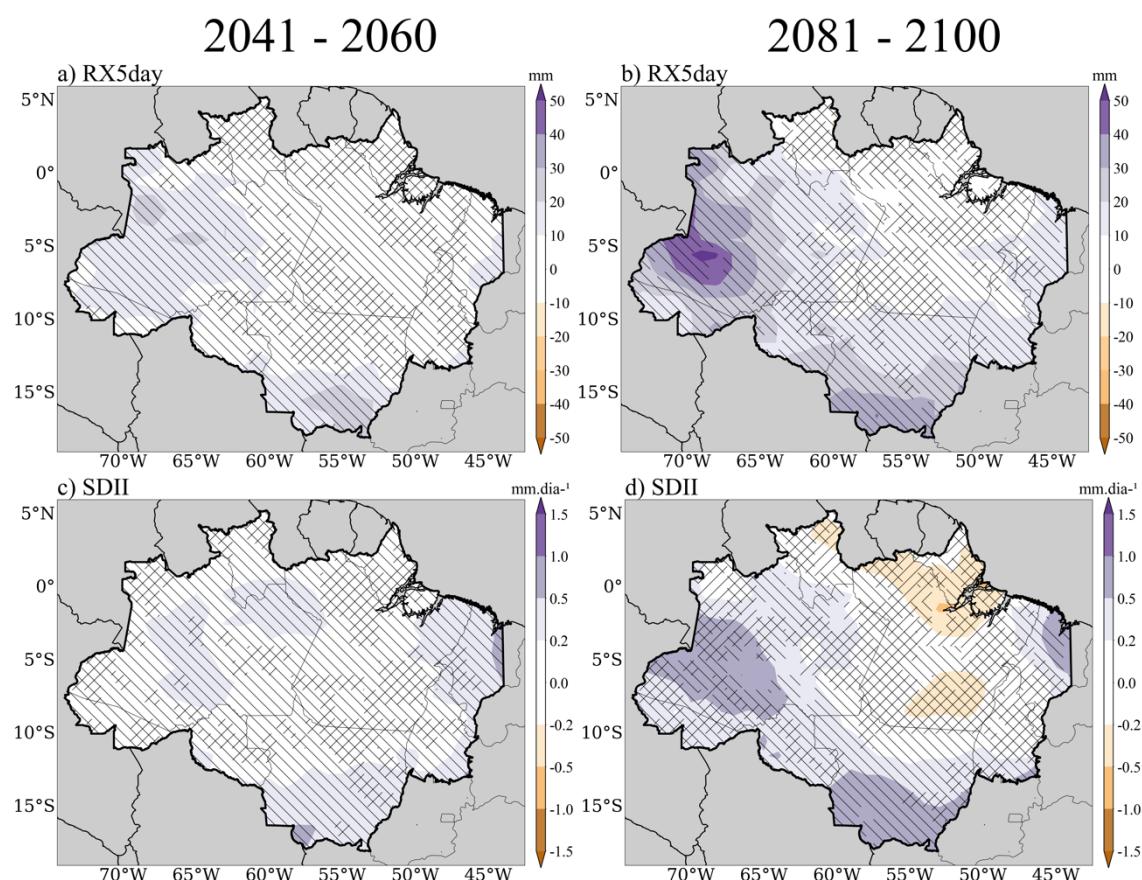


Figura 4.15 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) RX5day (mm/ano), e (c) e (d) SDII (mm/dia/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

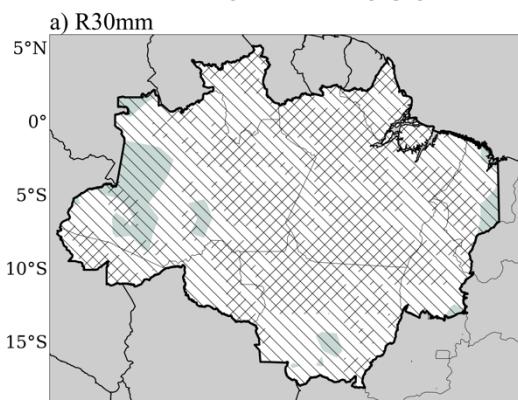
Tabela 4.8 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos RX5day (mm/ano) e SDII (mm/dia/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

RX5day (mm/ano)			
	Presente (1991 – 2020)	Futuro (2041 – 2060)	Futuro (2081 – 2100)
NO	127	137 (+10)	146 (+19)
NE	133	137 (+4)	136 (+3)
S	125	134 (+8)	144 (+19)

SDII (mm/dia/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	9,5	9,7 (+0,2)	9,8 (+0,3)
NE	9,5	9,7 (+0,2)	9,4 (-0,1)
S	9,7	9,9 (+0,2)	10 (+0,3)

Por fim, a Figura 4.16 apresenta as mudanças projetadas para os indicadores R30mm, CDD e CWD. No médio prazo, somente os indicadores CDD e CWD (Figura 4.16c, e) apresentam uma mudança expressiva em termos de magnitude e há concordância entre os modelos na maior parte da ALB, apesar de não representar uma mudança estatisticamente significativa. No caso do CDD, fica evidente que há uma diferença longitudinal na distribuição espacial do indicador: áreas onde se projeta um aumento acentuado de CDD estão ao leste da ALB, enquanto no oeste, além da concordância entre os modelos ser menor, o sinal da mudança é pouco expressivo em termos da magnitude. No NE e no S, o aumento desse indicador é de 15 dias/ano e 8 dias/ano (Tabela 4.9). Esse cenário mais seco também se traduz no indicador CWD (Figura 4.16e), onde os modelos projetam redução, principalmente no sul do PA, norte do MT e noroeste do AM.

2041 - 2060



2081 - 2100

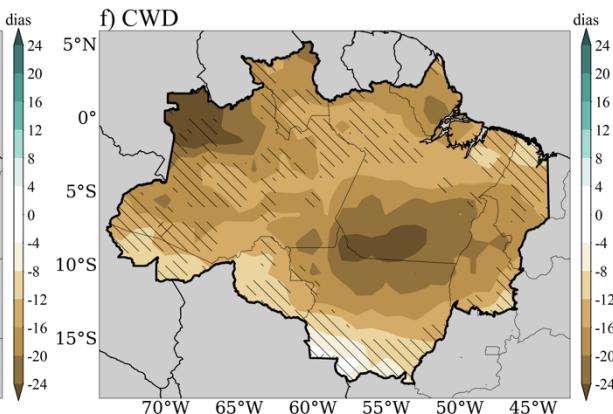
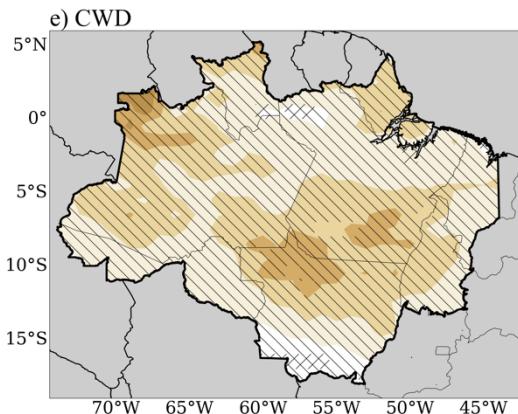
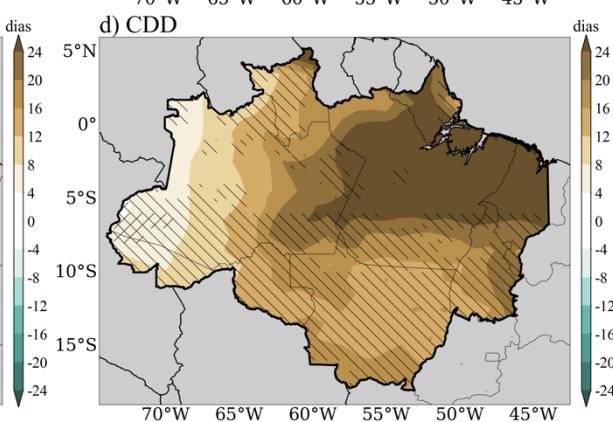
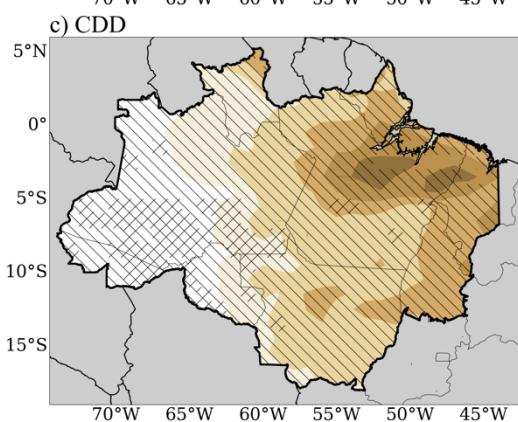
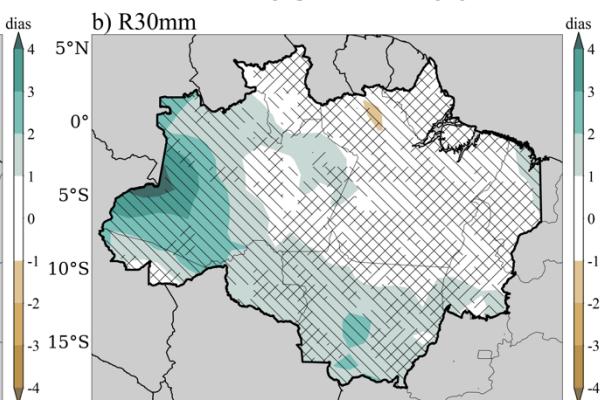


Figura 4.16 Mudanças projetadas para o período 2041-2060 (à esquerda) e para o período 2081-2100 (à direita) dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação: (a) e (b) R30mm (dia/ano), (c) e (d) CDD (dia/ano), e (e) e (f) CWD (dia/ano), sob cenário SSP5-8.5. Áreas não hachuradas representam mudanças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% onde pelo menos 66% dos modelos concordam com a direção do sinal da mudança. Linhas tracejadas à esquerda indicam áreas onde a mudança projetada não é estatisticamente significativa, enquanto linhas tracejadas à direita representam regiões sem concordância entre os modelos.

Tabela 4.9 Clima presente e futuro dos indicadores de extremos climáticos R30mm (dia/ano), CDD (dia/ano) e CWD (dia/ano) considerando as regiões NO, NE e S da ALB, sob cenário SSP5-8.5. Os valores médios dos indicadores no clima futuro correspondem a soma da mudança projetada (entre parênteses) com a climatologia do indicador no presente utilizando a base de dados BR-DWGD adotada como referência neste estudo.

R30mm (dias/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	10	11 (+1)	12 (+2)
NE	9	9 (sem mudança)	9 (sem mudança)
S	8	8 (sem mudança)	9 (+1)

CDD (dias/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	12	18 (+ 6)	27 (+15)
NE	30	45 (+15)	60 (+30)
S	62	70 (+8)	77 (+15)

CWD (dias/ano)			
	Presente (1991 - 2020)	Futuro (2041-2060)	Futuro (2081-2100)
NO	34	25 (-9)	17 (-18)
NE	42	34 (-8)	25 (-17)
S	26	18 (-8)	11 (-15)

No longo prazo, a magnitude das mudanças praticamente dobra nos indicadores CDD e CWD, enquanto no R30mm, tornam-se mais evidentes. Projeta-se um ligeiro aumento de dias com acumulados superiores a 30 mm na porção sul e principalmente no oeste da ALB (Figura 4.16b), onde há concordância entre os modelos. No caso do CDD (Figura 4.16d), quase toda a porção norte da ALB apresenta um sinal de mudança estatisticamente significativo. No PA, MA e sul do AP, esse aumento do CDD é superior a 24 dias secos consecutivos no ano. Na Tabela 4.9, verifica-se que no NE da ALB, espera-se um aumento de 30 dias secos consecutivos no ano, o que representa o dobro do que está sendo projetado nas demais regiões. Esse incremento no CDD corresponde a um aumento de 50% deste valor do indicador. Em relação ao CWD (Figura 4.16f), os modelos continuam projetando uma redução dos dias úmidos consecutivos, mas com mudanças mais acentuadas e estatisticamente significativas, principalmente no PA, sul e leste do AM e norte do MT. Em todas as 3 subregiões da ALB, essa diminuição varia entre -15 e

-18 dias úmidos consecutivos no ano. Esse padrão mais seco projetado para a ALB e representado pela redução dos dias úmidos e aumento dos dias secos consecutivos, foi constatado em diversos outros trabalhos (AVILA-DIAZ et al., 2020; VEIGA et al., 2023; SOUZA et al., 2024), principalmente no norte e leste da ALB. Duffy et al. (2015) mostram que a área atualmente afetada por seca meteorológica moderada à severa na Amazônia deve dobrar ou triplicar até o final do século 21. A redução do PRCPTOT e o aumento do CDD na porção nordeste da ALB podem estar relacionados com o estreitamento observado na ZCIT no decorrer dos últimos anos e também projetado ao longo das próximas décadas por muitos modelos climáticos (BYRNE et al., 2018).

4.2.3 Síntese das Projeções Futuras dos Extremos Climáticos

As projeções dos extremos de temperatura apontam para um cenário mais quente no médio e longo prazo em toda a ALB, já sinalizado por diversos outros estudos (AVILA-DIAZ et al. 2020; LI et al., 2021; VEIGA et al., 2023). Até o meio do século, projeta-se um aumento significativo das temperaturas máximas e mínimas na mesma magnitude e de forma homogênea em toda a área da bacia, mas no longo prazo esse incremento de temperatura será maior em TMAXmean. Isso se reflete no aumento significativo da amplitude térmica diária (DTR) de até 1,5°C para o final do século em toda a ALB. No que se refere aos extremos de temperatura máxima (TXx e TXn), os modelos apontam para um aumento mais pronunciado nas porções central, oeste e sul, enquanto no nordeste e leste, a magnitude da mudança é menor. É interessante ressaltar que as mudanças em TXx são maiores do que em TXn, em magnitude, mas ambos indicam um aquecimento significativo em toda a ALB. Esse padrão é verificado nas mudanças projetadas nos extremos de temperatura mínima (TNx e TNn), de modo que TNx exibe um incremento maior de temperatura em relação a TNn.

A mudança desses indicadores também é menor em magnitude no nordeste da ALB. O número de dias quentes, com temperaturas máximas acima de 35°C se elevará em média 75 dias no ano, no médio prazo e mais de 150 dias no ano, até o final do século, o que indica o aumento na frequência dos extremos quentes. Um padrão que fica evidente nas projeções dos extremos de temperatura do ar, principalmente no longo prazo, é que as mudanças apresentam magnitude inferior nas áreas próximas ao litoral da ALB. Tal padrão pode estar relacionado ao menor aumento projetado na TSM dos modelos na região equatorial do Oceano Atlântico (SUNG et al., 2021) em relação a temperatura do

ar sobre o continente, como pode ser visto nas projeções de temperatura do ar para o final do século sobre a América do Sul e oceanos adjacentes, apresentados em Ortega et al. (2021).

As projeções para os indicadores de extremos atrelados a precipitação mostram direções distintas na ALB, além da baixa significância estatística do sinal, sobretudo para o médio prazo. Apesar disso, a concordância entre os modelos é alta em regiões onde as mudanças projetadas são mais acentuadas. No geral, projeta-se uma redução nos totais pluviométricos anuais em praticamente toda a bacia, sendo mais acentuada e estatisticamente significativa no final do século para as porções norte e algumas áreas da porção central da ALB. Em contrapartida, os demais indicadores atrelados a intensidade das chuvas apontam para um aumento da precipitação nos setores oeste e sul da ALB. No entanto, apenas algumas áreas exibem um sinal estatisticamente significativo acerca desse aumento, como é o caso das mudanças projetadas no R95p para o centro-oeste e sul da ALB. Além disso, os modelos projetam um aumento sutil na frequência de chuvas fortes (acima de 30 mm/dia; R30mm) até o final do século, mas sem significância estatística. Por fim, as projeções dos indicadores CDD e CWD exibem um cenário mais seco em toda a ALB, sobretudo no final do século, onde o sinal da mudança é estatisticamente significativa. Na porção nordeste, além da redução do total pluviométrico anual, projeta-se um prolongamento do período seco, enquanto no centro-leste, espera-se uma redução significativa dos dias úmidos até o final do século. Nesse sentido, o paradigma “seco torna-se mais seco e úmido torna-se mais úmido” (*dry gets drier, wet gets wetter*; GREVE et al., 2014) verificado na análise das tendências não se configura nas projeções futuras, uma vez que os indicadores apontam para um clima mais seco mesmo em regiões com clima mais úmido.

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Tabelas 4.3 a 4.9 para as três regiões da ALB no final do século, indica que no S as mudanças projetadas nos indicadores de extremos de temperatura são mais pronunciadas, com maior aumento de TMAXmean, TMINmean, TXn, TNx e TNn. As taxas de aquecimento no NO também são muito próximas ao projetado para o S, com destaque para o TXx e SU35. Por fim no NE projetam-se as menores taxas de aquecimento para todos os indicadores de extremos de temperatura analisados. Em relação à chuva, das projeções estatisticamente significativas e onde há concordância entre os modelos, destaca-se apenas o clima mais seco para o NE, com redução de PRCPTOT (272 mm/ano), aumento de CDD (30

dias/ano) e redução de CWD (8 dias/ano). Os modelos concordam com o aumento das chuvas intensas (R95p) de 120 mm/ano no NO, apesar desse aumento não ser estatisticamente significativo.

A Figura 4.17 sintetiza as mudanças mais significativas projetadas nos extremos climáticos em toda a extensão da ALB, ou seja, maior aquecimento no S e no NO e menor aquecimento no NE e também aumento do CDD no NE e aumento da intensidade das chuvas intensas no NO.

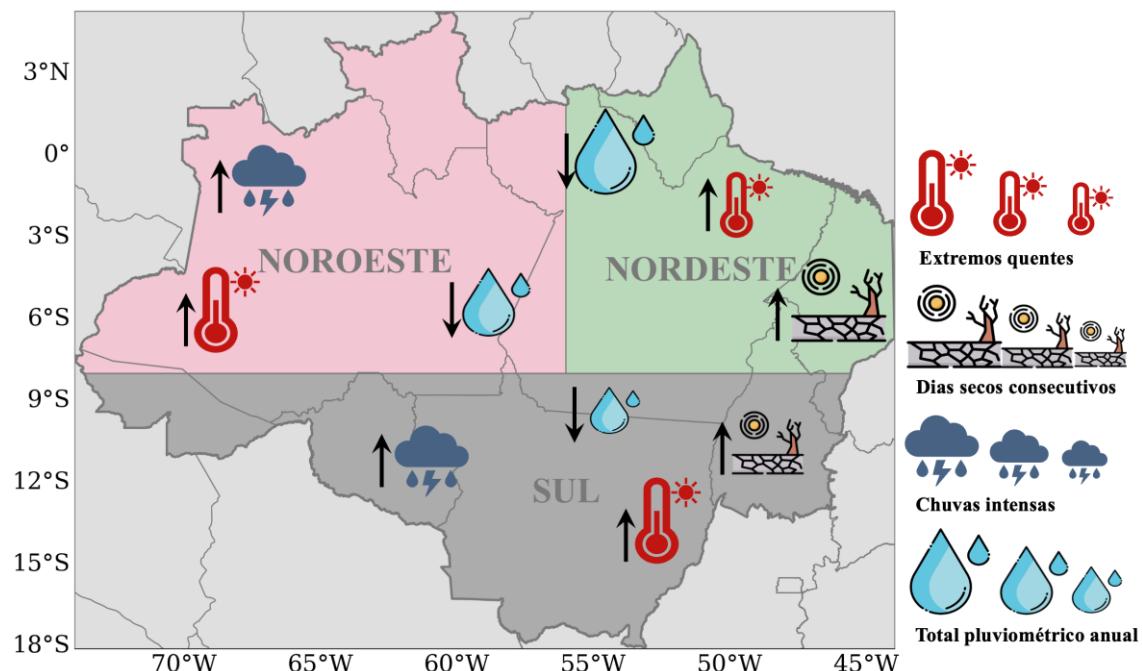


Figura 4.17 Resumo do comportamento das mudanças mais relevantes projetadas nos indicadores de extremos de temperatura do ar e de precipitação no final do século. Os tamanhos dos símbolos (pequeno, médio e grande) e sua localização no mapa são usados para destacar respectivamente a magnitude relativa entre as três regiões (NO, NE e S) e o local predominante onde essa mudança é projetada dentro de cada região. As setas para cima (baixo) indicam aumento (redução) da mudança projetada.

5 Conclusões

Neste trabalho foi feita uma investigação do clima da ALB. Na primeira etapa foi realizada uma análise do padrão climatológico dos extremos climáticos e de suas tendências no período 1961-2019 (1961-2021) para os extremos de temperatura do ar (precipitação) usando o conjunto de dados BR-DWGD. Na segunda etapa do trabalho foram investigadas as projeções de mudanças dos mesmos indicadores de extremos climáticos no médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazos em relação ao clima de

referência (1995-2014), sob cenário SSP5-8.5 a partir de dados de 12 modelos climáticos globais do CMIP6.

Acerca da climatologia da temperatura do ar na ALB, é importante destacar que há uma divisão clara entre os setores norte e sul da região. No setor norte da ALB, ocorrem as menores (maiores) temperaturas máximas (mínimas) em função da maior cobertura de nuvens. No sul/sudeste da ALB ocorrem as maiores temperaturas máximas, com TMAXmean atingindo 34°C e TXx em torno de 40°C, além da maior frequência de ocorrência de dias com TX superior a 35°C (SU35 em torno de 100 dias/ano). No sul/sudeste da ALB também ocorrem as menores temperaturas mínimas (TMINmean em torno de 17°C e TNn em torno de 14°C). Assim no sul/sudeste da ALB a amplitude térmica diária (DTR) é alta (14°C) em relação ao centro-norte, onde DTR é em média 7°C. O indicador que mostra a frequência das ondas de calor (WSFI) exibe um comportamento mais homogêneo espacialmente com uma média de 4 a 6 eventos/ano, porém com valores menores no NO da ALB.

O campo de precipitação, no geral, exibe uma variação leste/oeste na ALB, nesse sentido o setor oeste é mais úmido em virtude dos alísios e da evapotranspiração a leste dos Andes. Esse padrão pode ser verificado mais claramente através dos indicadores PRCPTOT, onde os totais pluviométricos anuais variam de 1300 mm (leste) a 3700 mm (oeste), e CDD, que exibe máximo de 100 dias/ano sem chuvas no leste e mínimo de 10 dias sem chuvas no oeste da ALB. O CWD, no entanto, exibe um padrão norte/sul atrelado à advecção de umidade do oceano Atlântico e à evapotranspiração da floresta Amazônica, que contribuem para valores maiores desse indicador no norte (em torno de 100 dias/ano) e menores no sul da ALB (em torno de 10 dias/ano). Os demais indicadores exibem diversos núcleos de máximos e mínimos, provavelmente devido à quantidade escassa de dados observados in situ e à baixa qualidade da interpolação.

Acerca das tendências observadas nos extremos de temperatura, nota-se um aquecimento significativo em toda a ALB, como apontado por estudos anteriores. Nos campos médios destaca-se a magnitude da tendência em TMINmean (+0,4°C/década no NE) que é maior em comparação à TMAXmean (+0,3°C/década no NO), o que se traduz na redução de DTR no NE. Nos indicadores de extremos, TNx e TNn, a magnitude do aumento foi maior no NE, com valores de 0,4 e 0,5°C/década, respectivamente. Esse mesmo padrão foi observado em TN10p, cuja tendência de redução é muito mais

pronunciada no NE (34 dias/década) do que no NO (14,6 dias/década). Os dias e noites quentes (TX90p e TN90p) apresentaram um aumento significativo no NO e NE, com aumento de 10,8 dias/década de TX90p e 14 dias/década de TN90p no NO. No NE verificou-se aumento de TX90p de 10,5 dias/década e de 11,9 dias de TN90p. Ressalta-se que a redução das noites frias (TN90p) é mais intensa do que o aumento das noites quentes (TX90p), como já evidenciado para as regiões Norte e Nordeste do Brasil por Dereczynski et al. (2020) e Regoto et al. (2021). No caso da tendência de WSDI e WSFI, o aumento mais pronunciado foi identificado no NO, principalmente em Roraima, onde WSDI (WSFI) aumentou em torno de 5 dias/década (2 eventos/década).

No caso dos indicadores de precipitação, as tendências não são tão uniformes e apresentam poucas áreas com sinal estatisticamente significativo, diferindo do que se observa no caso dos indicadores de temperatura. Nos setores norte e oeste da ALB, há um sinal significativo tanto de aumento quanto de redução do PRCPTOT. As maiores tendências de aumento desse indicador são observadas no norte do AP e na porção central do AM (150 a 200 mm/década). Entretanto, nos indicadores R95p, RX5day e SDII, notase uma tendência significativa de redução da intensidade das chuvas em diversas áreas no centro-oeste da ALB. Em relação ao CDD, há uma tendência significativa de aumento de 4 a 8 dias/década na porção leste e sudeste alinhado ao que foi identificado em estudos anteriores. No indicador CWD, a tendência de aumento é significativa em diversas áreas do oeste e do norte da ALB, principalmente no Amapá, com aumento que chega a 10 dias/década.

No que se refere às mudanças projetadas nos extremos de temperatura, verifica-se que todos os indicadores apontam para um aquecimento acentuado e estatisticamente significativo no médio e longo prazo em toda a ALB. Esse incremento na temperatura já vem sendo apontado nas tendências detectadas no clima presente. As projeções mostram um aumento das temperaturas máximas e mínimas médias (TMAXmean e TMINmean) em até 7°C até o final do século. A magnitude do aumento projetado para TMAXmean é maior em relação a TMINmean no longo prazo, o que se reflete no incremento de até 1,5°C na amplitude térmica diária (DTR) no final do século, seguindo o padrão oposto ao observado no clima presente.

Nos indicadores de extremos de temperatura máxima (TXx e TXn), projeta-se um aumento mais pronunciado nas porções central, oeste e sul da ALB, enquanto nos extremos de TMINmean, as mudanças projetadas na região são mais homogêneas no

médio prazo, mas exibem uma diferença norte-sul no final do século. Os modelos projetam um aumento maior em magnitude na porção sul da ALB, alinhado as tendências observadas que indicam um aumento mais pronunciado em regiões onde, climatologicamente, se observam os menores valores dos extremos mínimos (TXn e TNn). Alinhado ao sinal de aquecimento projetado pelos modelos nos demais indicadores, a frequência de dias quentes com temperaturas máximas acima de 35°C (SU35) aumentará significativamente até o final do século. No período de 2081-2100, a ALB experimentará mais de 1/3 do ano nessa condição. Ademais, as mudanças projetadas em todos os indicadores são maiores no interior do continente e são reduzidas em direção ao litoral, provavelmente associado com o menor aumento projetado na TSM dos modelos em relação a temperatura do ar sobre o continente. Ressalta-se que tal padrão não se verifica no clima presente ao analisar as tendências observadas dos indicadores de extremos de temperatura do ar.

As projeções dos indicadores de precipitação abrangem poucas áreas com significância estatística, sobretudo no médio prazo. Além disso, a direção da mudança é mais heterogênea comparada a temperatura, no qual todos os indicadores apontam para um aquecimento na ALB. Em relação a PRCPTOT, projeta-se uma redução em toda a região, e em maior magnitude no setor norte. No final do século, essa redução é significativa e em torno de 300 mm/ano em determinadas áreas do norte da ALB, como no AP. Esse sinal é oposto ao que se verifica no clima presente, onde as tendências observadas apontam para um aumento dos totais pluviométricos anuais nesse mesmo estado. Além disso, as mudanças projetadas na intensidade dos eventos extremos de chuva (R95p) indicam um aumento nos setores, sul, leste e, principalmente, oeste da ALB, sendo este aumento maior no final do século. Apesar dos modelos concordarem com o sinal da mudança, não há significância estatística, com exceção de algumas áreas do AM, MT e TO.

Os demais indicadores atrelados a intensidade (RX5day e SDII) e o R30mm também apontam na mesma direção de aumento, mas sem um sinal estatisticamente significativo mesmo no final do século. Similar ao que se verifica para o PRCPTOT, as projeções desses indicadores de extremos também se opõem às tendências observadas, que assinalam uma redução significativa da intensidade das chuvas no setor oeste da ALB. Por fim, projeta-se um aumento significativo de CDD para o final do século em algumas áreas do centro-norte da ALB, e nas demais regiões, os modelos concordam com o sinal

da mudança. Destaca-se o norte do PA, a região do MA contemplada na ALB e quase todo o AP, onde esse aumento de CDD é superior a 24 dias consecutivos no ano. Além disso, projeta-se uma redução significativa do CWD em algumas áreas da ALB, sendo maior em magnitude no sul do PA e norte do MT. Esse sinal projetado é contrário às tendências observadas, que denotam um aumento de CWD nessas mesmas áreas. De modo geral, as projeções mostram que o leste da ALB poderá ser o mais afetado no futuro com eventos de seca mais prolongados e períodos úmidos mais curtos, em conformidade com as tendências observadas no clima presente.

Considerando as projeções para o final do século e tomando como exemplo as estações meteorológicas da Figura 2.2, projeta-se por exemplo para a cidade de São Gabriel da Cachoeira (AM), no NO da ALB, que suas maiores temperaturas máximas (TXx) aumentariam de 36°C para 44°C no final do século, semelhante ao que se projeta para Cuiabá no MT. No estado do AP, mais precisamente sua capital (Macapá), projeta-se um aumento relativamente menor em TXx, em torno de 5°C, de 32°C para 37°C. O SU35 que atualmente é inferior a 30 dias/ano nas cidades de São Gabriel da Cachoeira e Macapá, aumentaria em torno de 150 dias, ficando com 160 a 180 dias por ano com temperaturas máximas acima de 35°C, enquanto em Cuiabá esse número é superior a 200 dias/ano. Atualmente, o PRCPTOT em Macapá e São Gabriel da Cachoeira atinge em média 2500 a 2800 mm/ano, e no futuro poderá ser reduzida de 250 a 300 mm. Em Macapá, os dias secos consecutivos, que atualmente ficam em torno de 20 dias/ano, aumentariam de 24 dias, passando a ter 39 dias/ano de CDD. Em Cuiabá, a região já experimenta em média 70 dias/ano sem chuva, e no futuro, esse valor poderá alcançar os 86 dias/ano.

A Amazônia contém uma acentuada biodiversidade e uma função vital nos múltiplos usos dos recursos hídricos, como agricultura, energia e irrigação. Desse modo, é fundamental que as tendências observadas sejam continuamente analisadas, enquanto as projeções futuras devem sempre ser reavaliadas em função de novos cenários e modelos climáticos. A floresta contribui significativamente como fonte de vapor d'água para áreas continentais tropicais, desempenhando assim um papel importante no ciclo hidrológico dessas regiões e, desse modo, tornando-se fundamental a investigação acerca dos extremos de temperatura e precipitação.

6 Referências

Aguiar, Ana Paula Dutra, Ima Célia Guimarães Vieira, Talita Oliveira Assis, Eloi L. Dalla-Nora, Peter Mann Toledo, Roberto Araújo Oliveira Santos-Junior, Mateus Batistella, et al. 2016. “Land Use Change Emission Scenarios: Anticipating a Forest Transition Process in the Brazilian Amazon.” *Global Change Biology* 22 (5): 1821–40. <https://doi.org/10.1111/GCB.13134>.

Almazroui, Mansour, Moetasim Ashfaq, M. Nazrul Islam, Irfan Ur Rashid, Shahzad Kamil, Muhammad Adnan Abid, Enda O’Brien, et al. 2021. “Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America.” *Earth Systems and Environment* 5 (2). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

Almazroui, Mansour, Fahad Saeed, Sajjad Saeed, M. Nazrul Islam, Muhammad Ismail, Nana Ama Browne Klutse, and Muhammad Haroon Siddiqui. 2020. “Projected Change in Temperature and Precipitation Over Africa from CMIP6.” *Earth Systems and Environment* 4 (3): 455–75. <https://doi.org/10.1007/S41748-020-00161-X/FIGURES/14>.

Almeida, C. T., J. F. Oliveira-Júnior, R. C. Delgado, P. Cubo, and M. C. Ramos. 2017. “Spatiotemporal Rainfall and Temperature Trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013.” *International Journal of Climatology* 37 (4). <https://doi.org/10.1002/joc.4831>.

Alvares, Clayton Alcarde, José Luiz Stape, Paulo Cesar Sentelhas, José Leonardo de Moraes Gonçalves, and Gerd Sparovek. 2013. “Köppen’s Climate Classification Map for Brazil.” *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Alves de Oliveira, Beatriz Fátima, Marcus J. Bottino, Paulo Nobre, and Carlos A. Nobre. 2021. “Deforestation and Climate Change Are Projected to Increase Heat Stress Risk in the Brazilian Amazon.” *Communications Earth & Environment* 2021 2:1 2 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>.

Alves, L. M., M. Â. F., Firpo, M. L., Bettolli, S., Hasson, O., Guerron, A. A., Añazco, and M. Llopert. 2023. “Projected Changes in the Frequency of Compound Events over Tropical Brazil in CORDEX-CORE Simulations.” *Climate Dynamics*.

Aragão, Luiz Eduardo O.C., Yadvinder Malhi, Rosa Maria Roman-Cuesta, Sassan Saatchi, Liana O. Anderson, and Yosio Edemir Shimabukuro. 2007. “Spatial Patterns and Fire Response of Recent Amazonian Droughts.” *Geophysical Research Letters* 34 (7). <https://doi.org/10.1029/2006GL028946>.

Arias, Paola A., Geusep Ortega, Laura D. Villegas, J. Alejandro Martínez, Paola A. Arias, Geusep Ortega, Laura D. Villegas, and J. Alejandro Martínez. 2021. “Colombian Climatology in CMIP5/CMIP6 Models: Persistent Biases and Improvements.” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 100 (July): 75–96. <https://doi.org/10.17533/UDEA.REDIN.20210525>.

Avila-Diaz, Alvaro, Gabriel Abrahão, Flavio Justino, Roger Torres, and Aaron Wilson. 2020. “Extreme Climate Indices in Brazil: Evaluation of Downscaled Earth System Models at High Horizontal Resolution.” *Climate Dynamics* 54 (11–12). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05272-9>.

Avila-Diaz, Alvaro, Victor Benezoli, Flavio Justino, Roger Torres, and Aaron Wilson. 2020. “Assessing Current and Future Trends of Climate Extremes across Brazil Based on Reanalyses and Earth System Model Projections.” *Climate Dynamics* 55 (5–6). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>.

Avila-Diaz, Alvaro, Roger Rodrigues Torres, Cristian Felipe Zuluaga, Wilmar L. Cerón, Lais Oliveira, Victor Benezoli, Irma Ayes Rivera, Jose Antonio Marengo, Aaron B. Wilson, and Felipe Medeiros. 2023. “Current and Future Climate Extremes Over Latin America and Caribbean: Assessing Earth System Models from High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP).” *Earth Systems and Environment* 7 (1). <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00337-7>.

Barichivich, Jonathan, Emanuel Gloor, Philippe Peylin, Roel J.W. Brienen, Jochen Schöngart, Jhan Carlo Espinoza, and Kanhu C. Pattnayak. 2018. “Recent Intensification of Amazon Flooding Extremes Driven by Strengthened Walker Circulation.” *Science*

https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAT8785/SUPPL_FILE/AAT8785_SM.PDF.

Bazzanella, Anna Carolina, Claudine Dereczynski, Wanderson Luiz-Silva, and Pedro Regoto. 2024. “Performance of CMIP6 Models over South America.” *Climate Dynamics* 62 (2). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06979-1>.

Bitencourt, Daniel P., Márcia v. Fuentes, Alberto E. Franke, Rafael B. Silveira, and Maikon P.A. Alves. 2020. “The Climatology of Cold and Heat Waves in Brazil from 1961 to 2016.” *International Journal of Climatology* 40 (4). <https://doi.org/10.1002/joc.6345>.

Bodas Terassi, Paulo Miguel de, Emerson Galvani, João Paulo Assis Gobo, Antonio Carlos da Silva Oscar-Júnior, Wanderson Luiz-Silva, Bruno Serafini Sobral, Givanildo de Gois, and Vitor Hugo Rosa Biffi. 2024. “Exploring Climate Extremes in Brazil’s Legal Amazon.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 38 (4). <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02634-7>.

Boisier, Juan P., Philippe Ciais, Agnès Ducharne, and Matthieu Guimbertea. 2015. “Projected Strengthening of Amazonian Dry Season by Constrained Climate Model Simulations.” *Nature Climate Change* 5 (7). <https://doi.org/10.1038/nclimate2658>.

Brando, Paulo M., Scott J. Goetz, Alessandro Baccini, Daniel C. Nepstad, Pieter S.A. Beck, and Mary C. Christman. 2010. “Seasonal and Interannual Variability of Climate and Vegetation Indices across the Amazon.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (33). <https://doi.org/10.1073/pnas.0908741107>.

Brumatti, Livia Maria, Luiz Felipe Sant’Anna Commar, Nathan de Oliveira Neumann, Gabrielle Ferreira Pires, and Alvaro Avila-Diaz. 2024. “Bias Correction in CMIP6 Models Simulations and Projections for Brazil’s Climate Assessment.” *Earth Systems and Environment* 8 (1). <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00368-8>.

Builes-Jaramillo, Alejandro, Norbert Marwan, Germán Poveda, and Jürgen Kurths. 2018. “Nonlinear Interactions between the Amazon River Basin and the Tropical North Atlantic at Interannual Timescales.” *Climate Dynamics* 50 (7–8). <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3785-8>.

Byrne, Michael P., Angeline G. Pendergrass, Anita D. Rapp, and Kyle R. Wodzicki. 2018. “Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength.” *Current Climate Change Reports* 4 (4): 355–70. <https://doi.org/10.1007/S40641-018-0110-5/FIGURES/4>.

Cai, Wenju, Michael J. McPhaden, Alice M. Grimm, Regina R. Rodrigues, Andréa S. Taschetto, René D. Garreaud, Boris Dewitte, et al. 2020. “Climate Impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America.” *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:4 1 (4): 215–31. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>.

Camera, Corrado, Adriana Bruggeman, Panos Hadjinicolaou, Stelios Pashiardis, and Manfred A. Lange. 2014. “Evaluation of Interpolation Techniques for the Creation of Gridded Daily Precipitation (1 × 1 Km²); Cyprus, 1980–2010.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (2): 693–712. <https://doi.org/10.1002/2013JD020611>.

Carvalho, Leila M. v., Charles Jones, and Brant Liebmann. 2002. “Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone.” *Journal of Climate* 15 (17): 2377–94. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015).

Chavez, Steven P., and Ken Takahashi. 2017. “Orographic Rainfall Hot Spots in the Andes-Amazon Transition According to the TRMM Precipitation Radar and in Situ Data.” *Journal of Geophysical Research* 122 (11). <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>.

Chou, Sin Chan, André Lyra, Caroline Mourão, Claudine Dereczynski, Isabel Pilotto, Jorge Gomes, Josiane Bustamante, et al. 2014. “Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios.” *American Journal of Climate Change* 03 (05). <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>.

Cohen, J C P, M A S Dias, and C A Nobre. 1989. “Aspectos Climatológicos Das Linhas de Instabilidade Na Amazônia.” *Climanálise* v.4, n. 11.

Collazo, Soledad, Mariana Barrucand, and Matilde Rusticucci. 2022. “Evaluation of CMIP6 Models in the Representation of Observed Extreme Temperature Indices Trends in South America.” *Climatic Change* 172 (1–2). <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03376-1>.

Collow, Allison B. Marquardt, Mark A. Miller, and Lynne C. Trabachino. 2016. “Cloudiness over the Amazon Rainforest: Meteorology and Thermodynamics.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121 (13): 7990–8005. <https://doi.org/10.1002/2016JD024848>.

Cook, Brian, Ning Zeng, and Jin Ho Yoon. 2012. “Will Amazonia Dry Out? Magnitude and Causes of Change from IPCC Climate Model Projections.” *Earth Interactions* 16 (3): 1–27. <https://doi.org/10.1175/2011EI398.1>.

Correa, Wesley de Souza Campos, Wagner Rodrigues Soares, Georgynio Yossimar Rosales Aylas, Neyval Costa Reis Junior, José Antonio Marengo, Sin Chan Chou, and Carlos Nobre. 2022. “Avaliação Das Simulações de Temperatura e Precipitação de Um Subconjunto de Modelos Do CMIP6 Para o Brasil.” *Derbyana* 43. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.774>.

Costa, Duarte F., Helber B. Gomes, Maria Cristina L. Silva, and Liming Zhou. 2022. “The Most Extreme Heat Waves in Amazonia Happened under Extreme Dryness.” *Climate Dynamics* 59 (1–2). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06134-8>.

Daly, Christopher. 2006. “Guidelines for Assessing the Suitability of Spatial Climate Data Sets.” *International Journal of Climatology* 26 (6): 707–21. <https://doi.org/10.1002/JOC.1322>.

Davidson, Eric A., Alessandro C. de Araújo, Paulo Artaxo, Jennifer K. Balch, I. Foster Brown, Mercedes M. Mercedes, Michael T. Coe, et al. 2012. “The Amazon Basin in Transition.” *Nature* 481:7381 481 (7381): 321–28. <https://doi.org/10.1038/nature10717>.

Decremer, Damien, Chul E. Chung, Annica M.L. Ekman, and Jenny Brandefelt. 2014. “Which Significance Test Performs the Best in Climate Simulations?” *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 66 (1): 23139. <https://doi.org/10.3402/TELLUSA.V66.23139>.

Dereczynski, Claudine, Sin Chan Chou, André Lyra, Marcely Sondermann, Pedro Regoto, Priscila Tavares, Diego Chagas, Jorge Luís Gomes, Daniela Carneiro Rodrigues, and María de los Milagros Skansi. 2020. “Downscaling of Climate Extremes over South

America – Part I: Model Evaluation in the Reference Climate.” Weather and Climate Extremes 29. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100273>.

Deser, Clara, Adam Phillips, Vincent Bourdette, and Haiyan Teng. 2012. “Uncertainty in Climate Change Projections: The Role of Internal Variability.” Climate Dynamics 38 (3–4): 527–46. <https://doi.org/10.1007/S00382-010-0977-X/FIGURES/17>.

Dias, Cássia Gabriele, and Michelle Simões Reboita. 2021. “Assessment of Cmip6 Simulations over Tropical South America.” Revista Brasileira de Geografia Fisica 14 (3). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>.

Dubreuil, Vincent, Karime Pechutti Fante, Olivier Planchon, and João Lima Sant’anna Neto. 2018. “Os Tipos de Climas Anuais No Brasil : Uma Aplicação Da Classificação de Köppen de 1961 a 2015.” Confins, no. 37. <https://doi.org/10.4000/confins.15738>.

Duffy, Philip B., Paulo Brando, Gregory P. Asner, and Christopher B. Field. 2015. “Projections of Future Meteorological Drought and Wet Periods in the Amazon.” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 112 (43): 13172–77. https://doi.org/10.1073/PNAS.1421010112/SUPPL_FILE/PNAS.201421010SI.PDF.

Espinoza, Jhan Carlo, Steven Chavez, Josyane Ronchail, Clémentine Junquas, Ken Takahashi, and Waldo Lavado. 2015. “Rainfall Hotspots over the Southern Tropical Andes: Spatial Distribution, Rainfall Intensity, and Relations with Large-Scale Atmospheric Circulation.” Water Resources Research 51 (5). <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>.

Espinoza, Jhan Carlo, Josyane Ronchail, José Antonio Marengo, and Hans Segura. 2019. “Contrasting North–South Changes in Amazon Wet-Day and Dry-Day Frequency and Related Atmospheric Features (1981–2017).” Climate Dynamics 52 (9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>.

Espinoza, Jhan-Carlo, Juan Carlos Jimenez, José Antonio Marengo, Jochen Schongart, Josyane Ronchail, Waldo Lavado-Casimiro, and João Vitor M. Ribeiro. 2024. “The New Record of Drought and Warmth in the Amazon in 2023 Related to Regional and Global Climatic Features.” Scientific Reports 14 (1): 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.

Ferreira Barbosa, Maria Lucia, Rafael Coll Delgado, Caio Forsad de Andrade, Paulo Eduardo Teodoro, Carlos Antonio Silva Junior, Henderson Silva Wanderley, and Guilherme Fernando Capristo-Silva. 2021. "Recent Trends in the Fire Dynamics in Brazilian Legal Amazon: Interaction between the ENSO Phenomenon, Climate and Land Use." *Environmental Development* 39 (September): 100648. <https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2021.100648>.

Ferreira, Glauber Willian de Souza, Michelle Simões Reboita, João Gabriel Martins Ribeiro, and Christie André de Souza. 2023. "Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections." *Climate* 11 (8). <https://doi.org/10.3390/cli11080166>.

Figueroa, Silvio N., and Carlos A. Nobre. 1990. "Precipitation Distribution over Central and Western Tropical South America." *Climanálise* 5 (6): 36–45.

FISCH, Gilberto, José A MARENGO, and Carlos A NOBRE. 1998. "Uma Revisão Geral Sobre o Clima Da Amazônia." *Acta Amazonica* 28 (2). <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>.

Fisch, Gilberto, Jose Antonio Marengo, and Carlos Nobre. 1992. "Clima Da Amazônia." *Revista Climanálise Especial - Edição Comemorativa 10 Anos CPTEC/INPE* 80 (ítem 6).

Frich, P., L. v. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M.G. Tank Klein, and T. Peterson. 2002. "Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century." *Climate Research* 19 (3). <https://doi.org/10.3354/cr019193>.

Fu, Yuning, Donald F. Argus, Jeffrey T. Freymueller, and Michael B. Heflin. 2013. "Horizontal Motion in Elastic Response to Seasonal Loading of Rain Water in the Amazon Basin and Monsoon Water in Southeast Asia Observed by GPS and Inferred from GRACE." *Geophysical Research Letters* 40 (23). <https://doi.org/10.1002/2013GL058093>.

Garcia, Beatriz Nunes, Renata Libonati, and Ana M.B. Nunes. 2018. "Extreme Drought Events over the Amazon Basin: The Perspective from the Reconstruction of South American Hydroclimate." *Water* 2018, Vol. 10, Page 1594 10 (11): 1594. <https://doi.org/10.3390/W10111594>.

Garreaud, René D., and John M. Wallace. 1998. "Summertime Incursions of Midlatitude Air into Subtropical and Tropical South America." *Monthly Weather Review* 126 (10). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2).

Geirinhas, João L., Ricardo M. Trigo, Renata Libonati, Caio A.S. Coelho, and Ana Cristina Palmeira. 2018. "Climatic and Synoptic Characterization of Heat Waves in Brazil." *International Journal of Climatology* 38 (4). <https://doi.org/10.1002/joc.5294>.

Giorgi, Filippo. 2019. "Thirty Years of Regional Climate Modeling: Where Are We and Where Are We Going Next?" *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124 (11). <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.

Gloor, M., R. J.W. Brienen, D. Galbraith, T. R. Feldpausch, J. Schöngart, J. L. Guyot, J. C. Espinoza, J. Lloyd, and O. L. Phillips. 2013. "Intensification of the Amazon Hydrological Cycle over the Last Two Decades." *Geophysical Research Letters* 40 (9). <https://doi.org/10.1002/grl.50377>.

Greve, Peter, Boris Orlowsky, Brigitte Mueller, Justin Sheffield, Markus Reichstein, and Sonia I. Seneviratne. 2014. "Global Assessment of Trends in Wetting and Drying over Land." *Nature Geoscience* 7 (10). <https://doi.org/10.1038/NGEO2247>.

Guimberteaup, Matthieu, Philippe Ciais, Juan Pablo Boisier, Ana Paula Dutra Aguiar, Hester Biemans, Hannes de Deurwaerder, David Galbraith, et al. 2017. "Impacts of Future Deforestation and Climate Change on the Hydrology of the Amazon Basin: A Multi-Model Analysis with a New Set of Land-Cover Change Scenarios." *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (3). <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>.

Haghtalab, Nafiseh, Nathan Moore, Brent Porter Heerspink, and David W. Hyndman. 2020. "Evaluating Spatial Patterns in Precipitation Trends across the Amazon Basin Driven by Land Cover and Global Scale Forcings." *Theoretical and Applied Climatology* 140 (1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03085-3>.

Horel, John D., Andrea N. Hahmann, and John E. Geisler. 1989. "An Investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas." *Journal of Climate* 2 (11). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1388:aiotac>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1388:aiotac>2.0.co;2).

IBGE. 2020. “Amazônia Legal.” 2020.
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15819-amazonia-legal.html?edicao=37404&t=o-que-e>.

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. “Technical Summary. In Climate Change 2021: The Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change.” Climate Change 2021 – The Physical Science Basis.

Jeferson de Medeiros, Felipe, Cristiano Prestrelo de Oliveira, and Alvaro Avila-Diaz. 2022. “Evaluation of Extreme Precipitation Climate Indices and Their Projected Changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6.” Weather and Climate Extremes 38. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>.

Jiménez-Muñoz, Juan C., José A. Sobrino, Cristian Mattar, and Yadvinder Malhi. 2013. “Spatial and Temporal Patterns of the Recent Warming of the Amazon Forest.” Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118 (11): 5204–15. <https://doi.org/10.1002/JGRD.50456>.

Jiménez-Muñoz, Juan C., Cristian Mattar, Jonathan Barichivich, Andrés Santamaría-Artigas, Ken Takahashi, Yadvinder Malhi, José A. Sobrino, and Gerard van der Schrier. 2016. “Record-Breaking Warming and Extreme Drought in the Amazon Rainforest during the Course of El Niño 2015–2016.” Scientific Reports 2016 6:1 6 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep33130>.

Joetzjer, E., H. Douville, C. Delire, and P. Ciais. 2013. “Present-Day and Future Amazonian Precipitation in Global Climate Models: CMIP5 versus CMIP3.” Climate Dynamics 41 (11–12): 2921–36. <https://doi.org/10.1007/S00382-012-1644-1> METRICS.

Karl, Thomas R., Neville Nicholls, and Anver Ghazi. 1999. "CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop Summary." In *Climatic Change*. Vol. 42. <https://doi.org/10.1023/A:1005491526870>.

Kendall, M. G. 1975. "Rank Correlation Methods (4th Edn.) Charles Griffin." San Francisco, CA.

Kharin, V. v., F. W. Zwiers, X. Zhang, and M. Wehner. 2013. "Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the CMIP5 Ensemble." *Climatic Change* 119 (2): 345–57. <https://doi.org/10.1007/S10584-013-0705-8/METRICS>.

Kumar, Sanjiv, Venkatesh Merwade, James L. Kinter, and Dev Niyogi. 2013. "Evaluation of Temperature and Precipitation Trends and Long-Term Persistence in CMIP5 Twentieth-Century Climate Simulations." *Journal of Climate* 26 (12). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00259.1>.

Langerwisch, F., S. Rost, D. Gerten, B. Poulter, A. Rammig, and W. Cramer. 2013. "Potential Effects of Climate Change on Inundation Patterns in the Amazon Basin." *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (6): 2247–62. <https://doi.org/10.5194/HESS-17-2247-2013>.

Lemes, Murilo da Costa Ruv, Michelle Simões Reboita, Roger Rodrigues Torres, and Gilberto F Fisch. 2020. "Projeções Da Temperatura Da Superfície Na Bacia Hidrográfica Do Rio Tietê – SP Para o Final Do Século XXI." *Revista Brasileira de Geografia Física* 13 (07). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3206-3218>.

Levy, M. C., A. v. Lopes, A. Cohn, L. G. Larsen, and S. E. Thompson. 2018. "Land Use Change Increases Streamflow Across the Arc of Deforestation in Brazil." *Geophysical Research Letters* 45 (8): 3520–30. <https://doi.org/10.1002/2017GL076526>.

Li, Chao, Francis Zwiers, Xuebin Zhang, Guilong Li, Ying Sun, and Michael Wehner. 2021. "Changes in Annual Extremes of Daily Temperature and Precipitation in CMIP6 Models." *Journal of Climate* 34 (9): 3441–60. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1013.1>.

LYRA, A. de A., CHOU, S. C., & SAMPAIO, G. de O.. (2016). Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. *Acta Amazonica*, 46(2), 175–188. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502225>

Llopert, Marta, Michelle Simões Reboita, Erika Coppola, Filippo Giorgi, Rosmeri Porfirio da Rocha, and Diego Oliveira de Souza. 2018. "Land Use Change over the Amazon Forest and Its Impact on the Local Climate." *Water* 2018, Vol. 10, Page 149 10 (2): 149. <https://doi.org/10.3390/W10020149>.

Longo, Marcos, Ryan G. Knox, Naomi M. Levine, Luciana F. Alves, Damien Bonal, Plinio B. Camargo, David R. Fitzjarrald, et al. 2018. "Ecosystem Heterogeneity and Diversity Mitigate Amazon Forest Resilience to Frequent Extreme Droughts." *New Phytologist* 219 (3). <https://doi.org/10.1111/nph.15185>.

Lucas, Edmundo Wallace Monteiro, Francisco de Assis Salviano de Sousa, Fabrício Daniel dos Santos Silva, Rodrigo Lins da Rocha Júnior, David Duarte Cavalcante Pinto, and Vicente de Paulo Rodrigues da Silva. 2021. "Trends in Climate Extreme Indices Assessed in the Xingu River Basin - Brazilian Amazon." *Weather and Climate Extremes*. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>.

Luiz Silva, Wanderson, Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, Maria Elvira Piñeiro Maceira, and Otto Corrêa Rotunno. 2019. "Climatological and Hydrological Patterns and Verified Trends in Precipitation and Streamflow in the Basins of Brazilian Hydroelectric Plants." *Theoretical and Applied Climatology* 137 (1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2600-8>.

Luiz-Silva, Wanderson, Antonio Carlos Oscar-Júnior, Iracema Fonseca Albuquerque Cavalcanti, and Felipe Treistman. 2021. "An Overview of Precipitation Climatology in Brazil: Space-Time Variability of Frequency and Intensity Associated with Atmospheric Systems." *Hydrological Sciences Journal* 66 (2). <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1863969>.

Luiz-Silva, Wanderson, Pedro Regoto, Camila Ferreira de Vasconcellos, Katia Cristina Garcia, and Felipe Beviláqua Foldes Guimarães. 2022. "A Comprehensive Analysis of Observed and Projected Climate Extremes of Temperature and Precipitation in Belo Monte Hydropower Plant - Eastern Amazon, Brazil." *International Journal of Climatology* 42 (16). <https://doi.org/10.1002/joc.7859>.

Malhi, Yadvinder, Luiz E.O.C. Aragão, David Galbraith, Chris Huntingford, Rosie Fisher, Przemyslaw Zelazowski, Stephen Sitch, Carol McSweeney, and Patrick Meir. 2009.

“Exploring the Likelihood and Mechanism of a Climate-Change-Induced Dieback of the Amazon Rainforest.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (49). <https://doi.org/10.1073/pnas.0804619106>.

Malhi, Yadvinder, J. Timmons Roberts, Richard A. Betts, Timothy J. Killeen, Wenhong Li, and Carlos A. Nobre. 2008. “Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon.” *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1146961>.

Malhi, Yadvinder, and James Wright. 2004. “Spatial Patterns and Recent Trends in the Climate of Tropical Rainforest Regions.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359 (1443): 311–29. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2003.1433>.

Mann, Henry B. 1945. “Non-Parametric Test Against Trend.” *Econometrica* 13 (3).

Marengo, J. A., and J. C. Espinoza. 2016. “Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts.” *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

Marengo, Jose A, J A Marengo, and J C Espinoza. 2015. “Review Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts.” *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

Marengo, Jose A., Matilde Rusticucci, Olga Penalba, and Madeleine Renom. 2010. “An Intercomparison of Observed and Simulated Extreme Rainfall and Temperature Events during the Last Half of the Twentieth Century: Part 2: Historical Trends.” *Climatic Change* 98 (3). <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9743-7>.

Marengo, Jose A., Carlos M. Souza, Kirsten Thonicke, Chantelle Burton, Kate Halladay, Richard A. Betts, Lincoln M. Alves, and Wagner R. Soares. 2018. “Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends.” *Frontiers in Earth Science* 6 (December): 425317. <https://doi.org/10.3389/FEART.2018.00228/BIBTEX>.

Marengo, Jose Antonio. 2006. “ON THE HYDROLOGICAL CYCLE OF THE AMAZON BASIN: A HISTORICAL REVIEW AND CURRENT STATE-OF-THE-ART.” *Revista Brasileira de Meteorologia* 3.

Marengo, Jose, Angel Cornejo, Prakky Satyamurty, Carlos Nobre, and William Sea. 1997. “Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994.” *Monthly Weather Review* 125 (11). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2).

Marques, Rosa De Fátima Cruz, and V. Brahmananda Rao. 2000. “Interannual Variations of Blockings in the Southern Hemisphere and Their Energetics.” *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 105 (D4). <https://doi.org/10.1029/1999jd901066>.

Medeiros, Felipe Jeferson de, Cristiano P. de Oliveira, Rafaela Dos S. Gomes, Maria L. da Silva, and Jório B. Cabral Júnior. 2021. “Hydrometeorological Conditions in the Semi-arid and East Coast Regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 Period.” *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias* 93 (1). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200198>.

Medeiros, Felipe Jeferson de, Cristiano Prestrelo de Oliveira, and Roger Rodrigues Torres. 2020. “Climatic Aspects and Vertical Structure Circulation Associated with the Severe Drought in Northeast Brazil (2012–2016).” *Climate Dynamics* 55 (9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05385-1>.

Student. 1908. “THE PROBABLE ERROR OF A MEAN.” *Biometrika* 6 (1): 1–25. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>.

Mendes, Monica Cristina Damião, Ricardo Machado Trigo, Iracema F.A. Cavalcanti, and Carlos C. DaCamara. 2008. “Blocking Episodes in the Southern Hemisphere: Impact on the Climate of Adjacent Continental Areas.” *Pure and Applied Geophysics* 165 (9–10): 1941–62. <https://doi.org/10.1007/S00024-008-0409-4/METRICS>.

New, Mark, Mike Hulme, Phil Jones, Mark New, Mike Hulme, and Phil Jones. 2000. “Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part II: Development of 1901-96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate.” *Jcli* 13 (13): 2217–38. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013).

NOAA. 2025. “Climate Change: Global Temperature.” May 29, 2025. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.

Nobre, Carlos A. 1983. “Tropical Heat Sources and Their Associated Large-Scale Atmospheric Circulation.”

Nobre, Carlos A, Guillermo O Obregón, José A Marengo, Rong Fu, and German Poveda. 2009. “Characteristics of Amazonian Climate: Main Features.” <https://doi.org/10.1029/2008GM000720>.

Nobre, Carlos A., Gilvan Sampaio, Laura S. Borma, Juan Carlos Castilla-Rubio, José S. Silva, and Manoel Cardoso. 2016. “Land-Use and Climate Change Risks in the Amazon and the Need of a Novel Sustainable Development Paradigm.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (39): 10759–68. https://doi.org/10.1073/PNAS.1605516113/SUPPL_FILE/PNAS.201605516SI.PDF.

Nobre, Paulo, Marta Malagutti, Domingos F. Urbano, Roberto A.F. de Almeida, and Emanuel Giarolla. 2009. “Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation.” *Journal of Climate* 22 (21). <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>.

Oliveira, Fernando Pereira de, and Marcos Daisuke Oyama. 2015. “Antecedent Atmospheric Conditions Related to Squall-Line Initiation over the Northern Coast of Brazil in July.” *Weather and Forecasting* 30 (5): 1254–64. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00120.1>.

O’Neill, Brian C., Claudia Tebaldi, Detlef P. van Vuuren, Veronika Eyring, Pierre Friedlingstein, George Hurtt, Reto Knutti, et al. 2016. “The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6.” *Geoscientific Model Development* 9 (9). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

Ortega, Geusep, Paola A. Arias, Juan Camilo Villegas, Pablo A. Marquet, and Paulo Nobre. 2021. “Present-Day and Future Climate over Central and South America According to CMIP5/CMIP6 Models.” *International Journal of Climatology* 41 (15). <https://doi.org/10.1002/joc.7221>.

Pabón-Caicedo, José Daniel, Paola A. Arias, Andrea F. Carril, Jhan Carlo Espinoza, Lluís Fita Borrel, Katerina Goubanova, Waldo Lavado-Casimiro, Mariano Masiokas, Silvina Solman, and Ricardo Villalba. 2020. “Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes.” *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>.

Panisset, Jéssica S., Renata Libonati, Célia Marina P. Gouveia, Fausto Machado-Silva, Daniela A. França, José Ricardo A. França, and Leonardo F. Peres. 2018. "Contrasting Patterns of the Extreme Drought Episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin." International Journal of Climatology 38 (2): 1096–1104. <https://doi.org/10.1002/JOC.5224>.

Perz, Stephen, Silvia Brilhante, Foster Brown, Marcellus Caldas, Santos Ikeda, Elsa Mendoza, Christine Overdevest, et al. 2008. "Road Building, Land Use and Climate Change: Prospects for Environmental Governance in the Amazon." In Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. Vol. 363. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0017>.

Reboita, Michelle Simões, Manoel Alonso Gan, Rosmeri Porfirio, D A Rocha, and E Tércio Ambrizzi. 2010. "Regimes de Precipitação Na América Do Sul: Uma Revisão Bibliográfica." Revista Brasileira de Meteorologia 25 (2): 185–204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.

Reboita, Michelle Simões, Cassia Akemi Castro Kuki, Vitor Hugo Marrafon, Christie Andre de Souza, Glauber Willian S. Ferreira, Thales Teodoro, and José Wanderley Marangon Lima. 2021. "South America Climate Change Revealed through Climate Indices Projected by GCMs and Eta-RCM Ensembles." Climate Dynamics 2021 58:1 58 (1): 459–85. <https://doi.org/10.1007/S00382-021-05918-2>.

Reboita, Michelle Simões, Rosmeri Porfirio da Rocha, Christie André de Souza, Thales Chile Baldoni, Pedro Lucas Lopes da Silveira Silva, and Glauber Willian S. Ferreira. 2022. "Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble." Atmosphere 13 (9). <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>.

Regoto, Pedro, Claudine Dereczynski, Sin Chan Chou, and Anna Carolina Bazzanella. 2021. "Observed Changes in Air Temperature and Precipitation Extremes over Brazil." International Journal of Climatology 41 (11). <https://doi.org/10.1002/joc.7119>.

Reis, Layara Campelo dos, Cláudio Moisés Santos e. Silva, Bergson Guedes Bezerra, Pedro Rodrigues Mutti, Maria Helena Constantino Spyrides, and Pollyanne Evangelista da Silva. 2020. "Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil."

Pure and Applied Geophysics 177 (9): 4457–78. <https://doi.org/10.1007/S00024-020-02474-4/METRICS>.

Riahi, Keywan, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, et al. 2017. “The Shared Socioeconomic Pathways and Their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview.” Global Environmental Change 42 (January): 153–68. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>.

Ricarte, Rita Micheline Dantas, Dirceu Luis Herdies, and Tatiane Felinto Barbosa. 2015. “Patterns of Atmospheric Circulation Associated with Cold Outbreaks in Southern Amazonia.” Meteorological Applications 22 (2): 129–40. <https://doi.org/10.1002/MET.1458>.

Robertson, Andrew W., and Carlos R. Mechoso. 2000. “Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone.” Monthly Weather Review 128 (8 II). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2947:iaivot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2947:iaivot>2.0.co;2).

Rothman, Dale S., Patricia Romero-Lankao, Vanessa J. Schweizer, and Beth A. Bee. 2014. “Challenges to Adaptation: A Fundamental Concept for the Shared Socio-Economic Pathways and Beyond.” Climatic Change 122 (3): 495–507. <https://doi.org/10.1007/S10584-013-0907-0/METRICS>.

S. Debortoli, Nathan, Vincent Dubreuil, Beatriz Funatsu, Florian Delahaye, Carlos Henke de Oliveira, Saulo Rodrigues-Filho, Carlos Hiroo Saito, and Raquel Fetter. 2015. “Rainfall Patterns in the Southern Amazon: A Chronological Perspective (1971–2010).” Climatic Change 132 (2). <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>.

Sansigolo, Clóvis Angeli, and Mary Toshie Kayano. 2010. “Trends of Seasonal Maximum and Minimum Temperatures and Precipitation in Southern Brazil for the 1913–2006 Period.” Theoretical and Applied Climatology 101 (1). <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0270-2>.

Santos, Ana Letícia Melo dos, Weber Andrade Gonçalves, Lara de Melo Barbosa Andrade, Daniele Tôrres Rodrigues, Flávia Ferreira Batista, Gizelly Cardoso Lima, and Cláudio Moisés Santos e Silva. 2024. “Space–Time Characterization of Extreme

Precipitation Indices for the Semiarid Region of Brazil.” *Climate* 12 (3). <https://doi.org/10.3390/cli12030043>.

Santos, Eliane Barbosa, Paulo Sérgio Lucio, and Cláudio Moisés Santos e Silva. 2015. “Precipitation Regionalization of the Brazilian Amazon.” *Atmospheric Science Letters* 16 (3): 185–92. <https://doi.org/10.1002/ASL2.535>.

Schweizer, Vanessa J., and Brian C. O’Neill. 2014. “Systematic Construction of Global Socioeconomic Pathways Using Internally Consistent Element Combinations.” *Climatic Change* 122 (3): 431–45. <https://doi.org/10.1007/S10584-013-0908-Z/FIGURES/3>.

Shepard, Donald. 1968. “A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data.” *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, ACM 1968, January, 517–24. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>.

Shepard, Donald S. 1984. “Computer Mapping: The SYMAP Interpolation Algorithm.” *Spatial Statistics and Models*, 133–45. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_7.

Sherbinin, Alex de. 2014. “Climate Change Hotspots Mapping: What Have We Learned?” *Climatic Change* 123 (1): 23–37. <https://doi.org/10.1007/S10584-013-0900-7/METRICS>.

Silva, Pollyanne Evangelista da, Cláudio Moisés Santos e Silva, Maria Helena Constantino Spyrides, and Lára de Melo Barbosa Andrade. 2019. “Precipitation and Air Temperature Extremes in the Amazon and Northeast Brazil.” *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>.

Skansi, María de los Milagros, Manola Brunet, Javier Sigró, Enric Aguilar, Juan Andrés Arevalo Groening, Oscar J. Bentancur, Yaruska Rosa Castellón Geier, et al. 2013. “Warming and Wetting Signals Emerging from Analysis of Changes in Climate Extreme Indices over South America.” *Global and Planetary Change* 100. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.

Solman, Silvina A., M. L. Bettolli, M. E. Doyle, M. E. Olmo, M. Feijoo, D. Martinez, J. Blázquez, and Rocio Balmaceda Huarte. 2021. “Evaluation of Multiple Downscaling Tools for Simulating Extreme Precipitation Events over Southeastern South America: A

Case Study Approach.” *Climate Dynamics* 57 (3–4). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05770-4>.

Sorribas, Mino Viana, Rodrigo C.D. Paiva, John M. Melack, Juan Martin Bravo, Charles Jones, Leila Carvalho, Edward Beighley, Bruce Forsberg, and Marcos Heil Costa. 2016. “Projections of Climate Change Effects on Discharge and Inundation in the Amazon Basin.” *Climatic Change* 136 (3–4): 555–70. <https://doi.org/10.1007/S10584-016-1640-2/METRICS>.

Sousa, Aline Corrêa de, L. A. Candido, and P. Satyamurty. 2021. “Convective Cloud Clusters and Squall Lines along the Coastal Amazon.” *Monthly Weather Review* 149 (11): 3589–3608. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0045.1>.

Souza, Everaldo B. de, Brenda C.S. Silva, Emilene M.F. Serra, Melgris J.Becerra Ruiz, Alan C. Cunha, Paulo J.P.O. Souza, Luciano P. Pezzi, et al. 2024. “Small Municipalities in the Amazon under the Risk of Future Climate Change.” *Climate* 2024, Vol. 12, Page 95 12 (7): 95. <https://doi.org/10.3390/CLI12070095>.

Souza, Everaldo Barreiros de, Alexandre Melo Casseb Carmo, Bergson Cavalcante Moares, Adelaide Nacif, Douglas Batista da Silva Ferreira, Edson José Paulino Rocha, and Paulo Jorge de Oliveira Ponte Souza. 2016. “SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA: CLIMA ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS USANDO O MODELO REGCM4 (SEASONAL PRECIPITATION OVER THE BRAZILIAN LEGAL AMAZON: CLIMATE CURRENT AND FUTURE PROJECTIONS USING REGCM4 MODEL).” *Revista Brasileira de Climatologia* 18 (October). <https://doi.org/10.5380/ABCLIMA.V18I0.43711>.

Staal, Arie, Stefan C. Dekker, Marina Hirota, and Egbert H. van Nes. 2015. “Synergistic Effects of Drought and Deforestation on the Resilience of the South-Eastern Amazon Rainforest.” *Ecological Complexity* 22 (June): 65–75. <https://doi.org/10.1016/J.ECOCOM.2015.01.003>.

Taylor, Karl E., Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl. 2012. “An Overview of CMIP5 and the Experiment Design.” *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Thackeray, Chad W., Anthony M. DeAngelis, Alex Hall, Daniel L. Swain, and Xin Qu. 2018. "On the Connection Between Global Hydrologic Sensitivity and Regional Wet Extremes." *Geophysical Research Letters* 45 (20). <https://doi.org/10.1029/2018GL079698>.

Tobin, Cara, Ludovico Nicotina, Marc B. Parlange, Alexis Berne, and Andrea Rinaldo. 2011. "Improved Interpolation of Meteorological Forcings for Hydrologic Applications in a Swiss Alpine Region." *Journal of Hydrology* 401 (1–2): 77–89. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.02.010>.

Tomasella, Javier, Patrícia F. Pinho, Laura S. Borma, José A. Marengo, Carlos A. Nobre, Olga R.F.O. Bittencourt, Maria C.R. Prado, Daniel A. Rodriguez, and Luz A. Cuartas. 2013. "The Droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: Floodplain Hydrology and Its Potential Ecological and Human Impacts." *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0508-3>.

Veiga, Sandro F., Paulo Nobre, Emanuel Giarolla, Vinícius B. Capistrano, Manoel B. da Silva, Fernanda Casagrande, Helena C. Soares, et al. 2023. "Climate Change over South America Simulated by the Brazilian Earth System Model under RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios." *Journal of South American Earth Sciences* 131 (November): 104598. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2023.104598>.

Viana, Liviany Pereira, and Dirceu Luis Herdies. 2018. "Case Study of a Cold Air Outbreak Incursion Extreme Event in July 2013 on Brazilian Amazon Basin." *Revista Brasileira de Meteorologia* 33 (1). <https://doi.org/10.1590/0102-7786331014>.

Vogel, Martha M., Mathias Hauser, and Sonia I. Seneviratne. 2020. "Projected Changes in Hot, Dry and Wet Extreme Events' Clusters in CMIP6 Multi-Model Ensemble." *Environmental Research Letters* 15 (9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab90a7>.

Westra, Seth, Lisa v. Alexander, and Francis W. Zwiers. 2013. "Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation." *Journal of Climate* 26 (11). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>.

Wilks, DS. 2011. "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences." <https://books.google.com/books?hl=pt->

BR&lr=&id=fxPiH9Ef9VoC&oi=fnd&pg=PP1&ots=ILmjOoi0_t&sig=2yXk8Sewk8vRQEykQUQtRVGKDRM.

Xavier, Alexandre C., Carey W. King, and Bridget R. Scanlon. 2016. “Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil (1980–2013).” *International Journal of Climatology* 36 (6): 2644–59. <https://doi.org/10.1002/JOC.4518>.

Xavier, Alexandre C., Bridget R. Scanlon, Carey W. King, and Aline I. Alves. 2022. “New Improved Brazilian Daily Weather Gridded Data (1961–2020).” *International Journal of Climatology* 42 (16). <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

Zhu, Boli, Lianqing Xue, Guanghui Wei, Luocheng Zhang, and Xinfang Chen. 2019. “CMIP5 Projected Changes in Temperature and Precipitation in Arid and Humid Basins.” *Theoretical and Applied Climatology* 136 (3–4): 1133–44. <https://doi.org/10.1007/S00704-018-2542-1/METRICS>.

Zilli, Marcia T., Leila M.V. Carvalho, Brant Liebmann, and Maria A. Silva Dias. 2017. “A Comprehensive Analysis of Trends in Extreme Precipitation over Southeastern Coast of Brazil.” *International Journal of Climatology* 37 (5). <https://doi.org/10.1002/joc.4840>.

Zubieta, Ricardo, Fernando Prudencio, Yerson Ccanchi, Miguel Saavedra, Juan Sulca, Jorge Reupo, and Glory Alarco. 2021. “Potential Conditions for Fire Occurrence in Vegetation in the Peruvian Andes.” *International Journal of Wildland Fire* 30 (11). <https://doi.org/10.1071/WF21029>.