Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL: CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Precipitation Extreme Indices in Brazil: Present Climate and Future Projections under Climate Change Scenarios

Índices de Extremos de Precipitación en Brasil: Clima Presente y Proyecciones Futuras bajo Escenarios de Cambio Climático

Carlos Henrique de Souza
Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas (NUVEM)
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
souza13.caique@gmail.com

Leila Limberger
Laboratório de Estudos da Dinâmica Ambiental (LEDA) - Departamento de Geografia,
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)
leila.limberger@unioeste.br

Gabriela Goudard
Laboratório de Climatologia e Estudos Ambientais (CLIMAS) - Departamento de Geografia,
Universidade Federal do Ceará (UFC)
gabriela.goudard@ufc.br

Marco Aurélio de Mello Machado
Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas (NUVEM),
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
marcomello@ufpr.br

Camila Bertoletti Carpenedo
Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas (NUVEM),
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
camila.carpenedo@ufpr.br

Resumo: Nas últimas décadas, há registros de aumento na frequência e/ou intensidade de eventos climáticos extremos em todo o planeta. O Brasil destaca-se nesse contexto devido à sua elevada exposição e vulnerabilidade, associadas à alta densidade populacional e à desigualdade social. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar a variabilidade e as mudanças nos índices de extremos de precipitação no Brasil no período histórico (1980-2019) e em cenários futuros de mudanças climáticas (2041-2100). Foram utilizados dados diários de precipitação (CPC/NOAA) para o cálculo dos índices anuais de extremos de precipitação (ETCCDI/WMO). Os mesmos índices foram obtidos do modelo climático EC-Earth3-Veg para os experimentos histórico (1981-2010), SSP1-2.6 (cenário otimista) e SSP5-8.5 (cenário pessimista). Os resultados indicam uma redução da precipitação total anual (PRCPTOT) em grande parte do país (1980-2019), acompanhada pelo aumento do número de dias secos consecutivos (CDD), especialmente nas Regiões Norte e Centro-Oeste. Observa-se ainda redução do número de dias úmidos consecutivos (CWD), sobretudo nas Regiões Norte e Nordeste. O número de dias chuvosos (R1mm) e dias com precipitação intensa (R20mm) apresenta predominância de redução no Brasil. De forma geral, os índices apresentam anomalias intensas e estatisticamente significativas no período de 2010-2019, que pode ser considerado como um ponto de inflexão da análise decadal. As projeções futuras sugerem um clima caracterizado por períodos secos mais prolongados, alternados com eventos de precipitação intensa concentrada, exceto na Região Sul, onde predominam chuvas mais intensas e frequentes. Esses resultados apontam para desafios crescentes na gestão dos recursos hídricos e na adaptação às mudanças climáticas no Brasil.
Palavras-chave: Variabilidade pluvial. Tendências climáticas. Desastres.

Abstract: In recent decades, there has been an increase in the frequency and/or intensity of extreme climate events worldwide. Brazil stands out in this context due to its high exposure and vulnerability, associated with high population density and social inequality. Therefore, the aim of this study is to assess the variability and changes in precipitation extreme indices in Brazil during the historical period (1980-2019) and under future climate change scenarios (2041-2100). Daily precipitation data (CPC/NOAA) were used to calculate annual precipitation extreme indices (ETCCDI/WMO). The same indices were derived from the EC-Earth3-Veg climate model for the historical experiment (1981-2010) and for the SSP1-2.6 (optimistic scenario) and SSP5-8.5 (pessimistic scenario) experiments. The results indicate a reduction in total annual precipitation (PRCPTOT) over large parts of the country (1980-2019), accompanied by an increase in the number of consecutive dry days (CDD), particularly in the North and Central-West regions. A decrease in the number of consecutive wet days (CWD) is also observed, especially in the North and Northeast regions. Decreases in the number of wet days (R1mm) and very heavy precipitation days (R20mm) predominate across Brazil. Overall, the indices exhibit intense and statistically significant anomalies during 2010-2019, which may be considered an inflection point in the decadal analysis. Future projections suggest a climate characterized by longer dry spells, interspersed with concentrated intense precipitation events, except in the Southern region, where more intense and frequent rainfall is projected. These results point to increasing challenges for water resource management and climate change adaptation in Brazil.
Keywords: Precipitation variability. Climate trends. Disasters.

Resumen: En las últimas décadas, se ha registrado un aumento en la frecuencia y/o intensidad de los eventos climáticos extremos en todo el planeta. Brasil se destaca en este contexto debido a su elevada exposición y vulnerabilidad, asociadas a la alta densidad poblacional y a la desigualdad social. En este sentido, el objetivo de este estudio es evaluar la variabilidad y los cambios en los índices de extremos de precipitación en Brasil durante el período histórico (1980-2019) y bajo escenarios futuros de cambio climático (2041-2100). Se utilizaron datos diarios de precipitación (CPC/NOAA) para el cálculo de los índices anuales de extremos de precipitación (ETCCDI/WMO). Los mismos índices se obtuvieron a partir del modelo climático EC-Earth3-Veg para los experimentos histórico (1981-2010), SSP1-2.6 (escenario optimista) y SSP5-8.5 (escenario pesimista). Los resultados indican una reducción de la precipitación total anual (PRCPTOT) en gran parte del país (1980-2019), acompañada de un aumento en el número de días secos consecutivos (CDD), especialmente en las regiones Norte y Centro-Oeste. Asimismo, se observa una disminución del número de días húmedos consecutivos (CWD), particularmente en las regiones Norte y Nordeste. El número de días lluviosos (R1mm) y de días con precipitación intensa (R20mm) muestra un predominio de reducciones en Brasil. En general, los índices presentan anomalías intensas y estadísticamente significativas en el período 2010-2019, el cual puede considerarse un punto de inflexión en el análisis decenal. Las proyecciones futuras sugieren un clima caracterizado por períodos secos más prolongados, intercalados con eventos de precipitación intensa concentrada, excepto en la región Sur, donde predominan lluvias más intensas y frecuentes. Estos resultados señalan desafíos crecientes para la gestión de los recursos hídricos y la adaptación al cambio climático en Brasil.

Palabras clave: Variabilidad de la precipitación. Tendencias climáticas. Desastres.

Submetido em: 11/02/2026
Aceito para publicação em: 25/08/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem sido registrado aumento na frequência e/ou intensidade de eventos climáticos extremos em nível global (Zilli *et al.*, 2017; Pampuch *et al.*, 2025). Entre os fatores associados a essas mudanças, destaca-se a influência humana, por meio da emissão de gases de efeito estufa (Seneviratne *et al.*, 2021), resultante de diversas atividades, como transporte, geração de energia por termelétricas, processos industriais, agropecuária, desmatamento e queimadas.

O Brasil necessita de atenção especial em relação aos impactos dos eventos climáticos extremos, uma vez que tem elevado grau de exposição e vulnerabilidade, associado à existência de regiões com alta densidade populacional e desigualdade social. Do total de perdas econômicas associadas a desastres na América do Sul entre 1970 e 2019, 40% referem-se ao Brasil, totalizando US$ 41,7 bilhões em prejuízos (WMO, 2021).

Dentre os eventos climáticos extremos mais severos registrados no país, destaca-se a seca histórica na Região Sudeste entre 2014 e 2015, que resultou em escassez hídrica para o abastecimento público, a geração de energia e a irrigação, em aumento de 150% no número de focos de queimadas, na morte de cerca de 20 toneladas de peixes somente no Rio Piracicaba, entre outros impactos negativos (Coelho *et al.*, 2016). Mais recentemente, o evento extremo chuvoso no Rio Grande do Sul entre o final de abril e o início de maio de 2024 resultou em diversos desastres, como inundações, alagamentos, enxurradas e movimentos de massa. Esse evento afetou mais de 90% dos municípios do estado e mais de 2,3 milhões de pessoas, desalojando em torno de 581 mil habitantes e ocasionando 185 óbitos (Rio Grande do Sul, 2025). Os prejuízos totais somaram R$ 11 bilhões, sendo R$ 4,6 bilhões em habitações e R$ 3,1 bilhões na agricultura (CNM, 2024).

Em cenários futuros de mudanças climáticas, os eventos climáticos extremos tendem a se tornar ainda mais frequentes e intensos (Eyring *et al.*, 2021), o que deve agravar os impactos negativos a eles relacionados. Embora as populações de baixa renda apresentem menores emissões *per capita* de gases de efeito estufa, estas possuem maior vulnerabilidade climática e ambiental, especialmente por residirem em áreas de risco (Rauh *et al.*, 2008; Saraswat; Kumar, 2016; Gore, 2020). Dessa forma, ações de prevenção e adaptação representam medidas importantes para reduzir as desigualdades sociais e ambientais frente aos eventos climáticos extremos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade e as mudanças nos índices de extremos de precipitação no Brasil, no período histórico e em cenários futuros de mudanças climáticas, com o intuito de subsidiar ações de prevenção, adaptação e gestão de riscos climáticos no país.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Dados

A precipitação pluvial diária foi obtida do *CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation, National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA/OAR/ESRL PSL), com espaçamento horizontal global de 0,5° × 0,5° de latitude e longitude (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html).

Os índices anuais de extremos de precipitação para o Brasil (Tabela 1), propostos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), foram obtidos do *Climate Data Store* do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Copernicus Climate Change Service, 2022) para diferentes experimentos realizados com o modelo climático EC-Earth3-Veg (https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-extreme-indices-cmip6). Este modelo possui resolução espacial de 0,7° de latitude × 0,7° de longitude (Firpo *et al.*, 2022), integrando o *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6; Eyring *et al.*, 2021), que serviu de base para a elaboração do *Sixth Assessment Report* (AR6) do IPCC.

O modelo EC-Earth3-Veg foi escolhido por apresentar um dos menores vieses na simulação da precipitação no Brasil dentre os modelos do CMIP6 (Firpo *et al.*, 2022). Esse modelo foi desenvolvido de forma colaborativa, através do consórcio de investigação europeia EC-Earth, com o objetivo de fornecer um produto integrado de última geração para estudos do sistema terrestre (Döscher *et al.*, 2022). Foram avaliados os seguintes experimentos do EC-Earth3-Veg: histórico (1981-2010), SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (2041-2070 e 2071-2100). O SSP1-2.6 é um cenário de baixa emissão, caracterizado pela redução de emissões de CO_2, com estimativa central de aquecimento global de 1,8°C em 2081-2100, em relação ao período pré-industrial de 1850-1900. O SSP5-8.5, em contrapartida, é o cenário mais pessimista, com aumento substancial de emissão de CO_2 até o final do século XXI e incrementos superiores a 4°C na temperatura média global acima dos níveis pré-industriais (Chen *et al.*, 2021).

Tabela 1 - Índices de extremos de precipitação: definições e unidades de medida.

Índice	Definição	Unidade
PRCPTOT	Precipitação total anual de dias úmidos, com precipitação total diária ≥ 1,0 mm	mm
CDD	Número máximo de dias consecutivos secos com precipitação total diária < 1,0 mm	dias
CWD	Número máximo de dias consecutivos úmidos com precipitação total diária ≥ 1,0 mm	dias
R1mm	Número de dias em um ano com precipitação ≥ 1 mm/dia	dias
R20mm	Número de dias em um ano com precipitação ≥ 20 mm/dia	dias
SDII	Índice de intensidade diária simples, definido como a razão entre a precipitação total anual acumulada nos dias úmidos (≥ 1 mm) e o número de dias úmidos (≥ 1 mm)	mm/dia

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.2. Métodos

A partir da precipitação observada (CPC/NOAA), foram calculados os índices de extremos de precipitação para o Brasil (*cf.* Tabela 1), considerando o período de 1980 a 2019. Os índices de extremos observados foram avaliados por década (1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 e 2010-2019), em comparação com todo o período de análise (1980-2019). A significância estatística dos campos de diferença (anomalias) foi obtida por meio do teste t de *Student*, ao nível de 5% (Wilks, 2006).

Para avaliar as mudanças na frequência e na intensidade dos índices de extremos de precipitação em cenários futuros de mudanças climáticas (SSP1-2.6 e SSP5-8.5), considerando o futuro próximo (2041-2070) e o futuro distante (2071-2100), estes índices foram comparados ao experimento histórico (1981-2010) por meio da análise de campos de diferença.

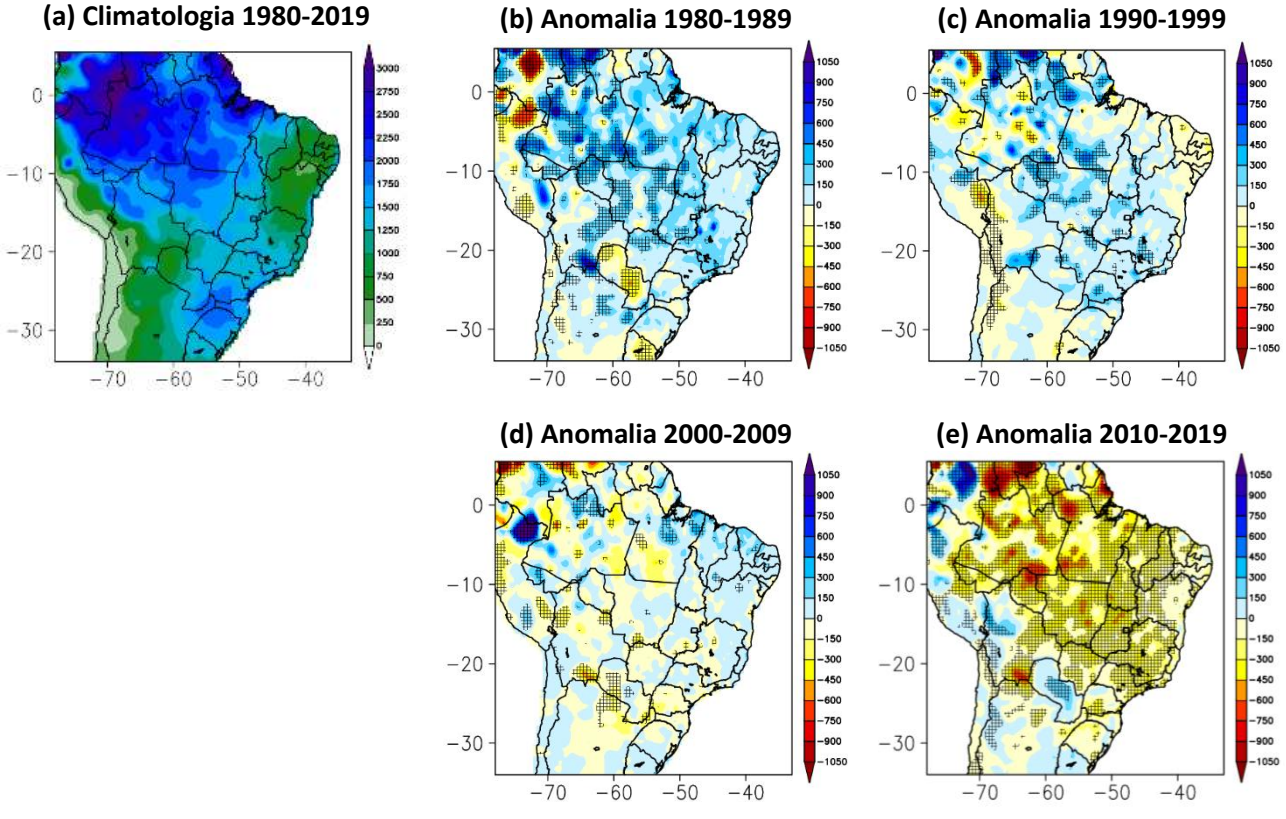
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Índices de extremos de precipitação no Brasil: climatologia e variabilidade

A climatologia da precipitação total anual (PRCPTOT; figura 1a), no período de 1980 a 2019, variou entre 250 mm/ano, em pequenas áreas na Região Nordeste, e 3.000 mm na Região Norte. Este padrão reflete a variabilidade pluvial anual no Brasil, com maiores acumulados de precipitação no Norte e no Sul do país, em decorrência dos principais

moduladores das chuvas na América do Sul, quais sejam: a Zona de Convergência Intertropical, a Zona de Convergência do Atlântico Sul, o Jato de Baixos Níveis da América do Sul e os sistemas frontais (Ferreira; Reboita, 2022). Na década de 1980-1989 (Figura 1b), a PRCPTOT apresentou anomalia predominantemente positiva no território brasileiro, enquanto, ao longo das décadas seguintes (Figuras 1c, 1d e 1e), houve um aumento gradual das áreas com anomalia negativa de precipitação, com desvios mais intensos na Região Norte, atingindo até -1.050 mm. Na década de 2010-2019, a anomalia negativa de precipitação total atinge praticamente todo o território, mostrando uma mudança significativa no padrão espacial do total anual de precipitação.

Figura 1 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice PRCPTOT (mm). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.

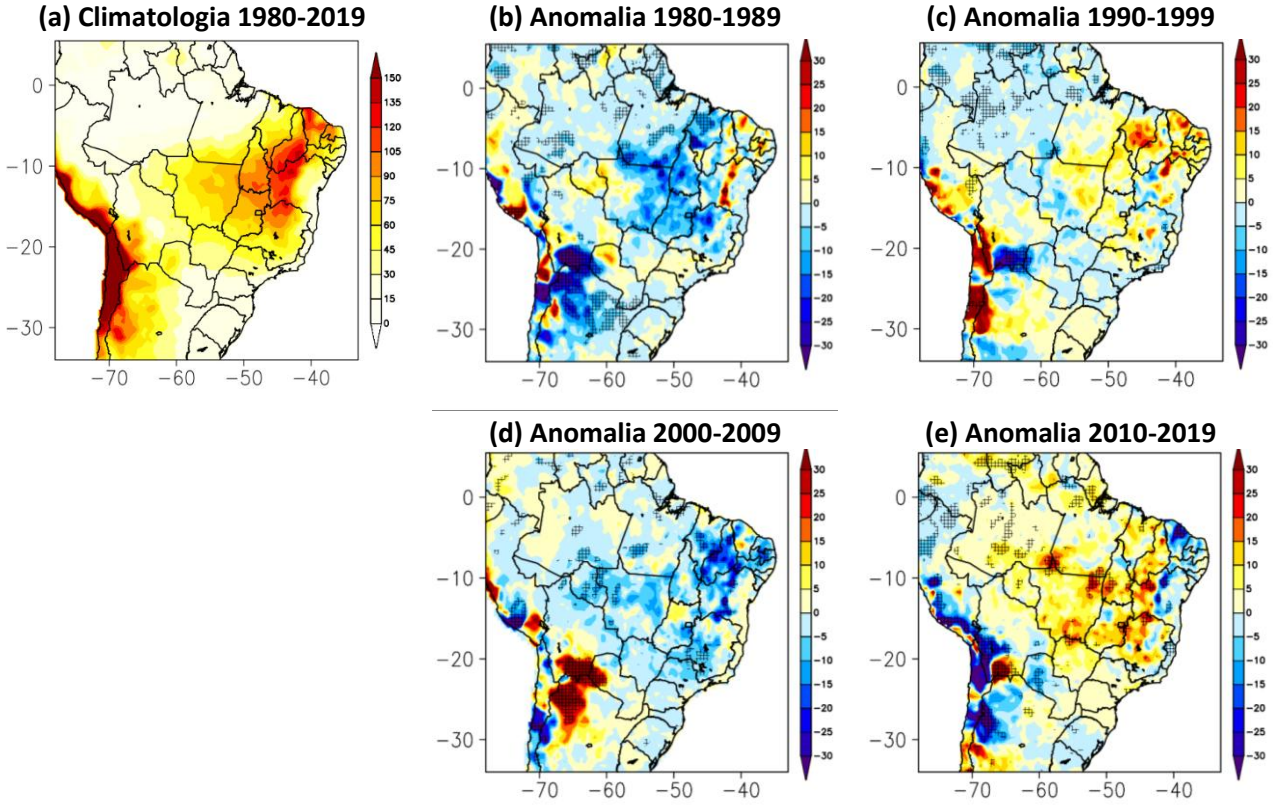


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Essa tendência de redução no total de precipitação, no entanto, não se deu de forma linear. Quando se analisa o índice de número máximo de dias secos consecutivos com precipitação total diária inferior a 1,0 mm (CDD; Figura 2a), verifica-se que, quanto à climatologia (1980-2019), os maiores valores ocorrem entre a Região Nordeste, o norte de

Minas Gerais e o leste do Tocantins (clima tropical típico), variando entre 105 e 150 dias secos consecutivos. Por outro lado, as Regiões Sul e Norte do país apresentam os menores valores de CDD, com predomínio de 15 a 30 dias. Quando se avalia a anomalia por décadas, percebe-se um padrão de aumento dos valores de CDD no decorrer da série histórica. Na década de 1980-1989 (Figura 2b), houve anomalia negativa do CDD em partes da Região Norte, Centro-Oeste e no oeste da Região Nordeste do país, atingindo redução de até 25 dias no sul do Maranhão. Nas décadas seguintes, 1990-1999 e 2000-2009 (Figuras 2c-d), persistiu anomalia negativa do CDD em áreas das Regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. Nos anos mais recentes, 2010-2019 (Figura 2e), ocorreu uma inversão do sinal, com aumento dos valores de CDD em praticamente todo o país, destacando-se áreas das Regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, especialmente em uma faixa com orientação noroeste-sudeste entre o Amazonas e Minas Gerais, com incremento de até 30 dias consecutivos secos no oeste da Bahia. Isso pode indicar um prolongamento dos períodos secos nessas áreas de clima tropical.

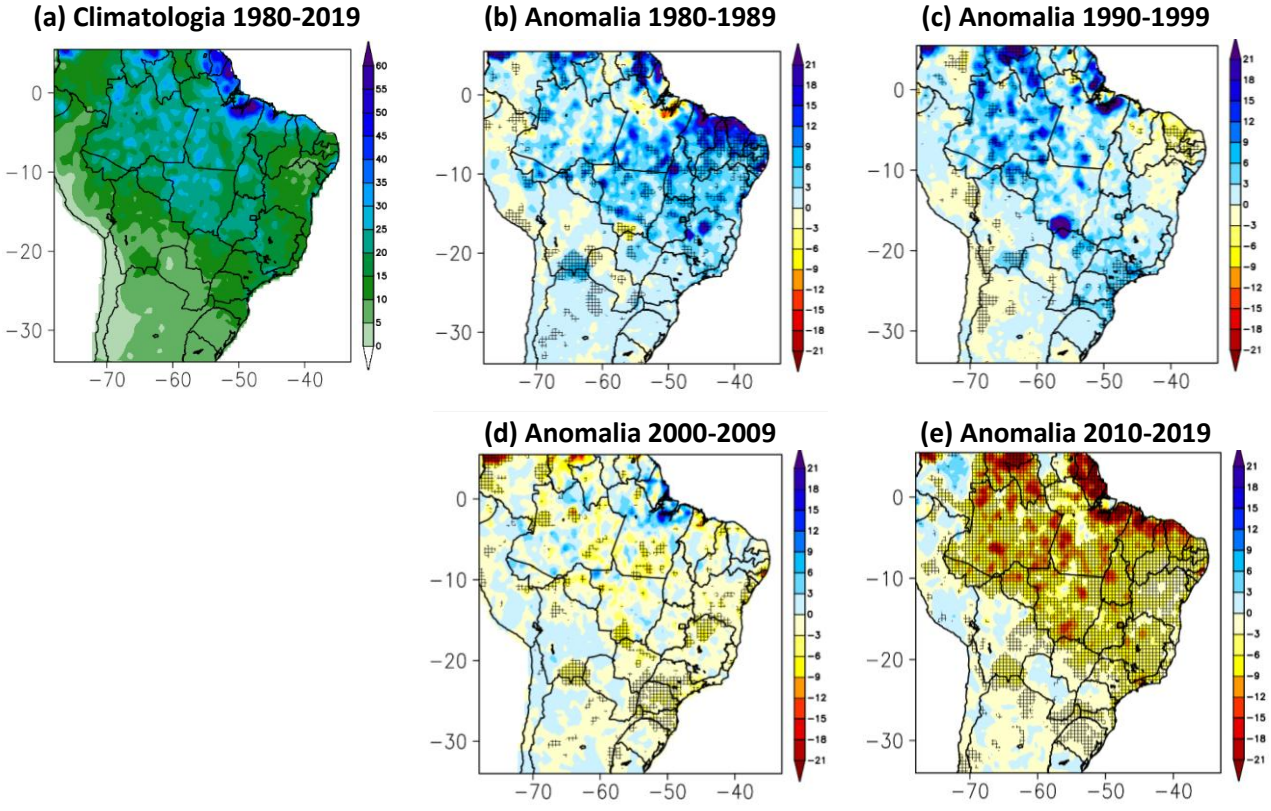
Figura 2 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para as décadas de (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice CDD (dias). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quanto ao número máximo de dias úmidos consecutivos (CWD), a climatologia (Figura 3a) apresenta os maiores valores no norte da Região Norte e em parte da Região Nordeste do Brasil, com até 60 dias úmidos consecutivos. Por outro lado, os menores valores do índice CWD são observados principalmente no Rio Grande do Sul, com até 10 dias úmidos consecutivos. Na década de 1980-1989 (Figura 3b), predominou anomalia positiva do CWD, especialmente no norte da Região Nordeste (até 21 dias). Na década seguinte (1990-1999; Figura 3c), houve inversão do sinal da anomalia de CWD na Região Nordeste, com redução de até 6 dias, e um padrão levemente positivo no restante do país. A partir da década de 2000-2009 (Figura 3d), passou a predominar anomalia negativa do CWD no Brasil, de forma que na década mais recente (2010-2019; Figura 3e) quase todo o país apresentou redução estatisticamente significativa do número de dias úmidos consecutivos, com maiores desvios no norte das Regiões Nordeste e Norte, atingindo até -21 dias.

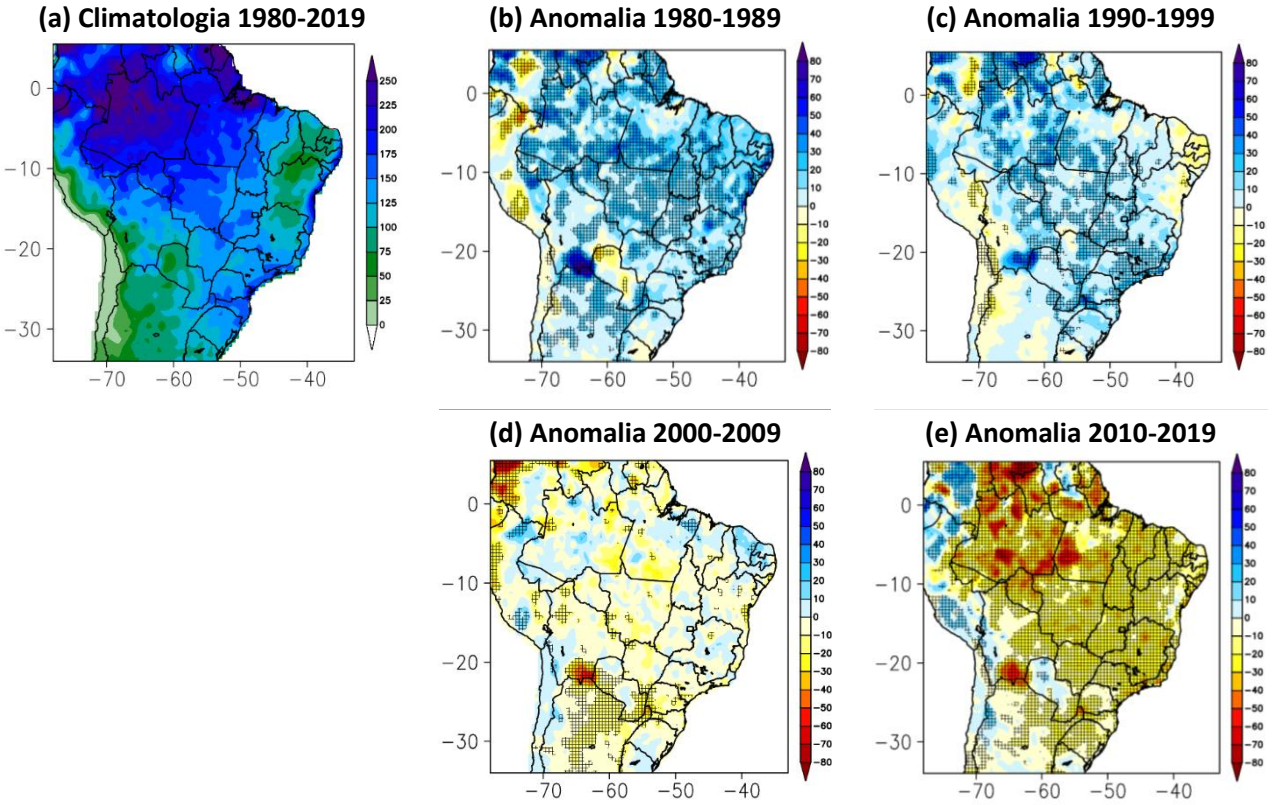
Figura 3 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice CWD (dias). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação à climatologia do R1mm (Figura 4a), os maiores valores são observados na Região Norte do país, com até 250 dias de precipitação no ano. Por outro lado, entre a Região Nordeste e o norte de Minas Gerais são observados os menores valores de R1mm, de até 50 dias. Entre as décadas de 1980-1989 e 1990-1999 (Figuras 4b-c), houve predomínio de aumento do número de dias úmidos no Brasil. Por outro lado, na década mais recente (2010-2019), praticamente todo o país apresentou redução no R1mm, com desvios de até -80 dias (Figura 4e).

Figura 4 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice R1mm (dias). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.

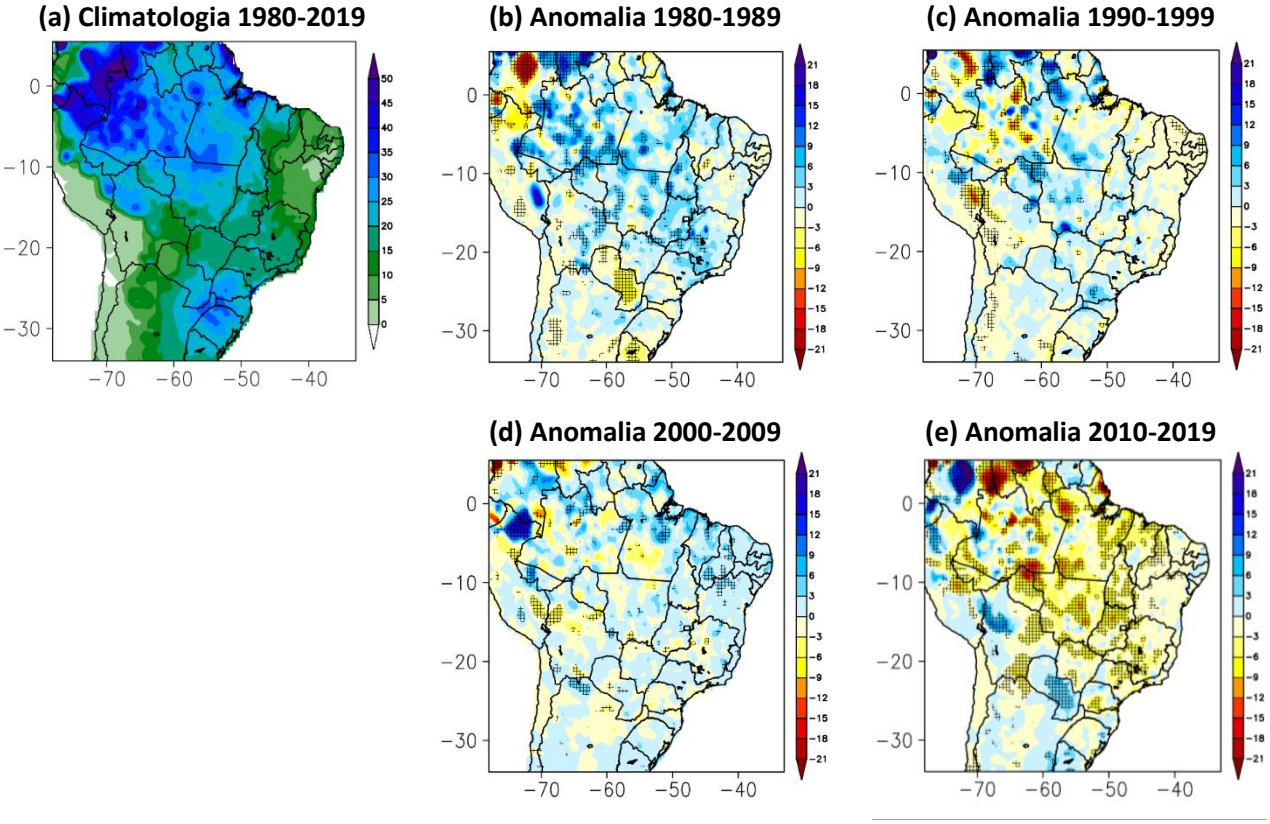


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A climatologia do número de dias em um ano com precipitação ≥ 20 mm/dia (R20mm; Figura 5a) apresenta maiores valores nas Regiões Norte e Sul do Brasil, com até 50 dias com precipitação ≥ 20 mm. Por outro lado, no leste da Região Nordeste são observados os menores valores de R20mm, com até 5 dias com precipitação ≥ 20 mm. Na análise das anomalias por década, observa-se anomalia positiva do R20mm em uma faixa com orientação noroeste-sudeste entre o Amazonas e Minas Gerais na década de 1980-1989. Nas décadas seguintes,

de 1990-1999 e 2000-2009 (Figuras 5c-d), as áreas com anomalias do índice R20mm foram mais esparsas no país, dominando redução no leste da Região Nordeste e no Amazonas, e aumento no norte de Rondônia. Por outro lado, na década de 2010-2019 predominou redução no R20mm no Brasil.

Figura 5 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice R20mm (dias). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.

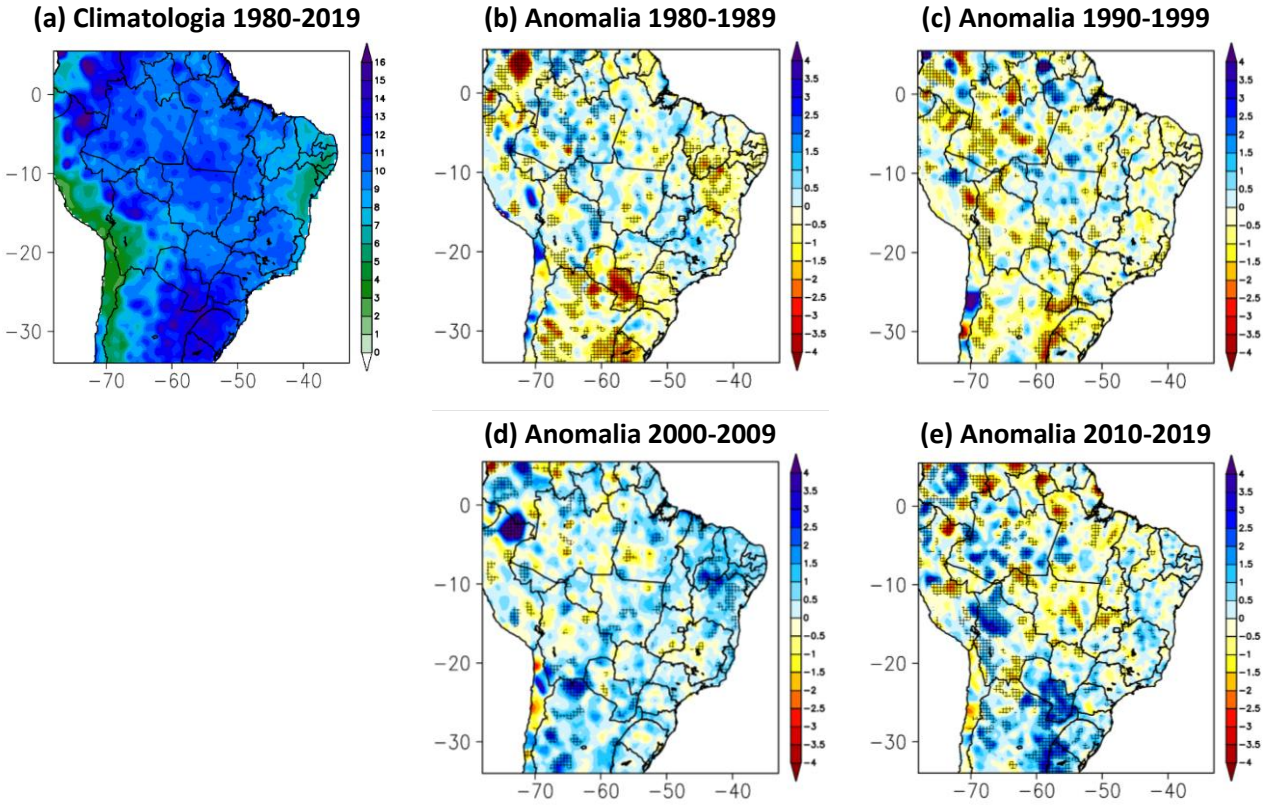


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação à climatologia do índice de intensidade diária simples (SDII; Figura 6a), os maiores valores são observados na Região Sul, com até 15 mm/dia no noroeste do Rio Grande do Sul, e menores no leste da Região Nordeste, com 3 mm/dia. Entre as décadas de 1980-1989 e 1990-1999 (Figuras 6b-c), predominou anomalia negativa da intensidade da precipitação no Brasil, especialmente na Região Nordeste (década de 1980) e Norte (década de 1990). Na década de 2000-2009 o predomínio foi de anomalia positiva na Região Nordeste, com até +3,5 mm/dia. Na década mais recente, de 2010-2019 (Figura 6e), a redução no SDII prevaleceu no Norte e na Região Centro-Oeste do Brasil, enquanto houve aumento em uma faixa entre o sul do Amazonas e o sudoeste do Pará, além do norte de Minas Gerais e áreas da Região Sul,

especialmente sobre o Rio Grande do Sul, com aumento de até 4 mm/dia. O aumento da intensidade da precipitação nessas áreas pode contribuir para a ocorrência de enxurradas, alagamentos e inundações, dependendo também das condições locais.

Figura 6 – (a) Climatologia (1980-2019) e anomalias para (b) 1980-1989, (c) 1990-1999, (d) 2000-2009 e (e) 2010-2019 do índice SDII (mm/dia). Áreas hachuradas indicam anomalias com significância estatística ao nível de 5%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De forma geral, os resultados indicam que o Brasil vem passando por um processo de intensificação das condições de seca (Avila-Diaz *et al*., 2020; Marrafon; Reboita, 2020), especialmente na década de 2010-2019, com redução da precipitação total anual (PRCPTOT), aumento expressivo do número de dias secos consecutivos (CDD), redução do número de dias consecutivos úmidos (CWD), redução do número de dias com precipitação diária igual ou superior a 20 mm (R20mm) e redução do número de dias com chuva (R1mm). Por outro lado, anomalias positivas de SDII indicam que, quando da ocorrência de eventos de precipitação, estes tendem a ser mais concentrados, podendo agravar os impactos nas áreas atingidas.

Destaca-se, neste contexto, o estado do Amazonas, onde se evidencia o aumento da intensidade de eventos extremos, tanto associados a períodos secos quanto a períodos

úmidos. Os resultados estão em concordância com o estudo realizado por Gloor *et al*. (2015), que aponta alterações significativas no ciclo hidrológico amazônico, com aumento de precipitações durante o período chuvoso e reduções no período seco.

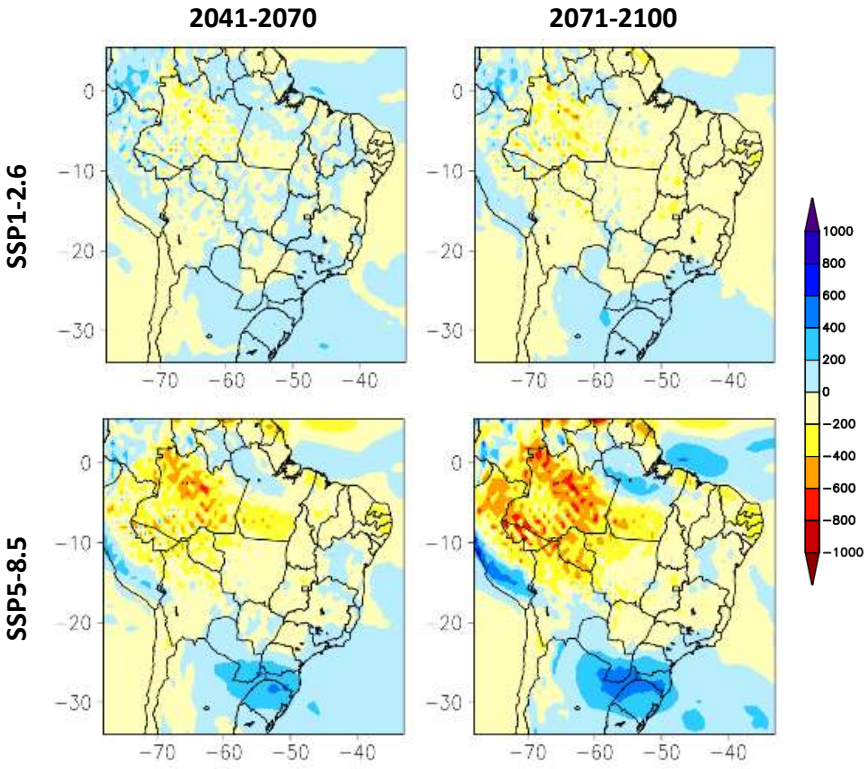
Para as demais regiões fica evidente uma transição para um clima mais seco ao longo dos 40 anos avaliados, com aumentos do índice CDD e redução dos índices CWD e R1mm. Esses resultados indicam intensificação dos eventos secos, associados à redução da precipitação total e da frequência de dias chuvosos, especialmente na última década (Giorgi *et al.*, 2019; Avila-Diaz *et al.*, 2020). Tais evidências reforçam a necessidade de ações de planejamento, gestão de riscos e adaptação das cidades aos eventos climáticos extremos.

3.2. Índices de extremos de precipitação no Brasil em cenários futuros de mudanças climáticas

Procurando entender como esses índices tendem a se comportar em cenários de aquecimento global, nas Figuras 7-12 são apresentadas as análises comparativas entre os cenários futuros de mudanças climáticas simulados pelo modelo EC-Earth3-Veg para diferentes índices de extremos de precipitação, considerando os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, caracterizados como otimista e pessimista, respectivamente.

Em relação ao índice PRCPTOT no cenário SSP1-2.6 (Figura 7), observa-se, no futuro próximo (2041-2070), predomínio de redução em relação ao período histórico (1981-2010), especialmente no centro-norte do Brasil, enquanto predomina aumento de até 200 mm na Região Sul. No futuro distante (2071-2100), esse padrão espacial é intensificado, atingindo reduções de até 600 mm em áreas pontuais do Amazonas. No cenário SSP5-8.5 o padrão espacial observado no cenário SSP1-2.6 é ainda mais intenso, com redução do índice PRCPTOT em grande parte do país, alcançando valores inferiores a -1000 mm no centro-oeste da Região Norte, e aumento na Região Sul de até +600 mm, entre o norte do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina no período de 2071-2100.

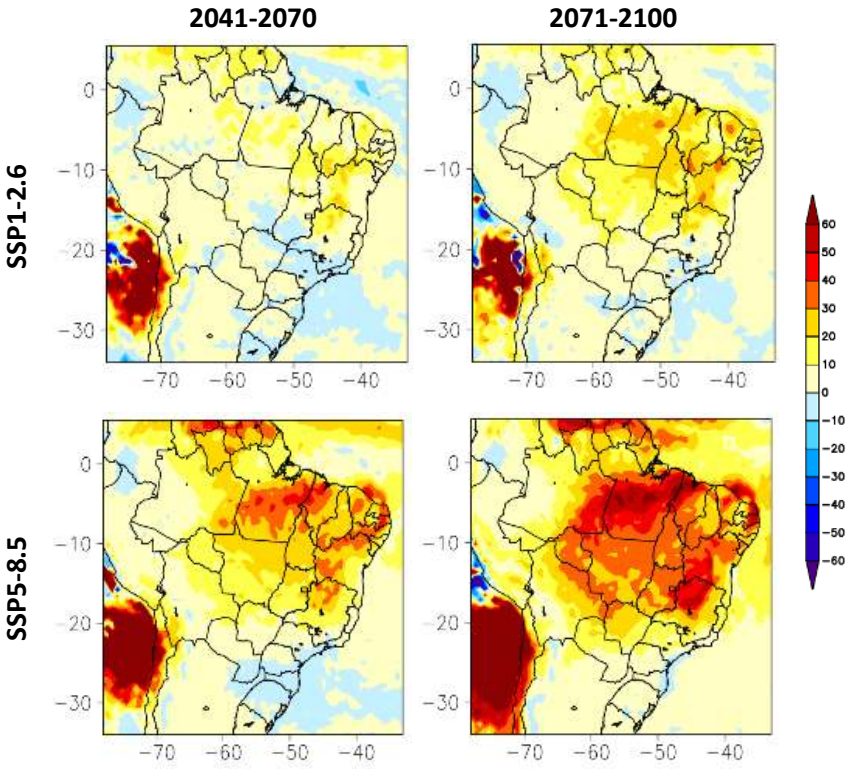
Figura 7 – Índice PRCPTOT (mm): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação ao índice CDD (Figura 8), no cenário SSP1-2.6, observa-se, entre 2041 e 2070, aumento no centro-norte do país, especialmente sobre a região do Semiárido Brasileiro. Esse aumento é ainda mais intenso entre 2071 e 2100, com acréscimo de até 40 dias secos consecutivos em relação ao período histórico (1981-2010). No cenário SSP5-8.5, entre 2041 e 2070, é observado um padrão espacial semelhante ao SSP1-2.6, porém com maiores magnitudes, alcançando aumentos de até 50 dias secos consecutivos no centro-leste da Região Norte e no leste da Região Nordeste. No futuro distante (2071-2100), verifica-se um aumento ainda mais expressivo do CDD no centro-norte do Brasil, com 60 dias secos consecutivos adicionais em relação ao período histórico entre os estados do Pará e Maranhão.

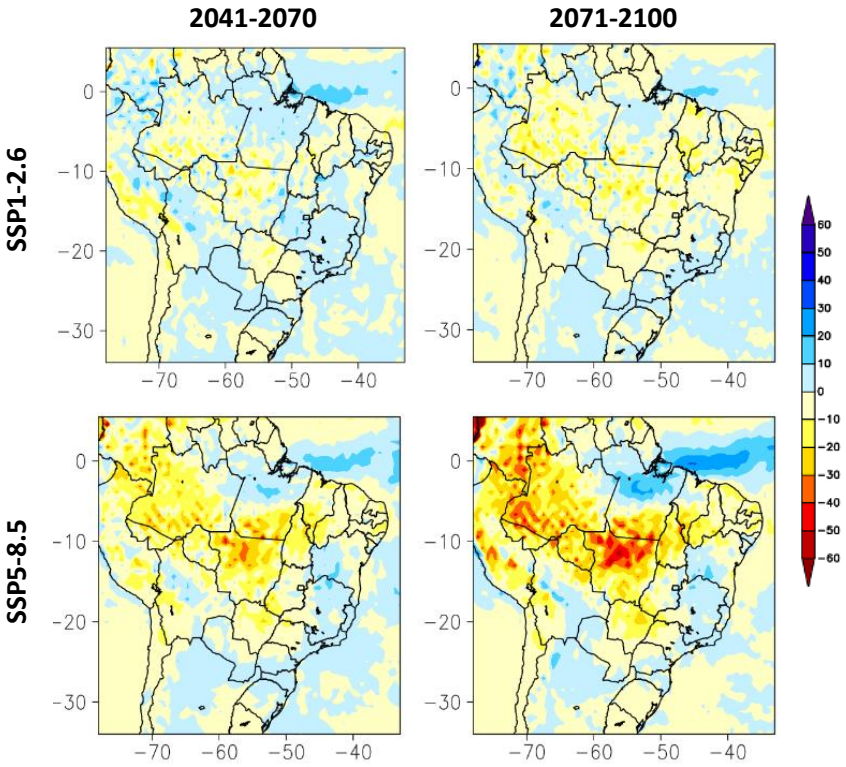
Figura 8 – Índice CDD (dias): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação ao índice CWD (Figura 9) no cenário SSP1-2.6, as maiores reduções são observadas entre o Amazonas e o Mato Grosso, com redução de até 30 dias úmidos consecutivos no futuro distante (2071-2100). No cenário SSP5-8.5, essa redução é intensificada, alcançando valores de 60 dias úmidos consecutivos a menos no Mato Grosso em relação ao período histórico (1981-2010). Estes resultados dos índices PRCPTOT, CDD e CWD reforçam os indicativos de ampliação de períodos de menores aportes pluviais no Brasil, sobretudo nas regiões Norte e Centro-Oeste.

Figura 9 – Índice CWD (dias): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.



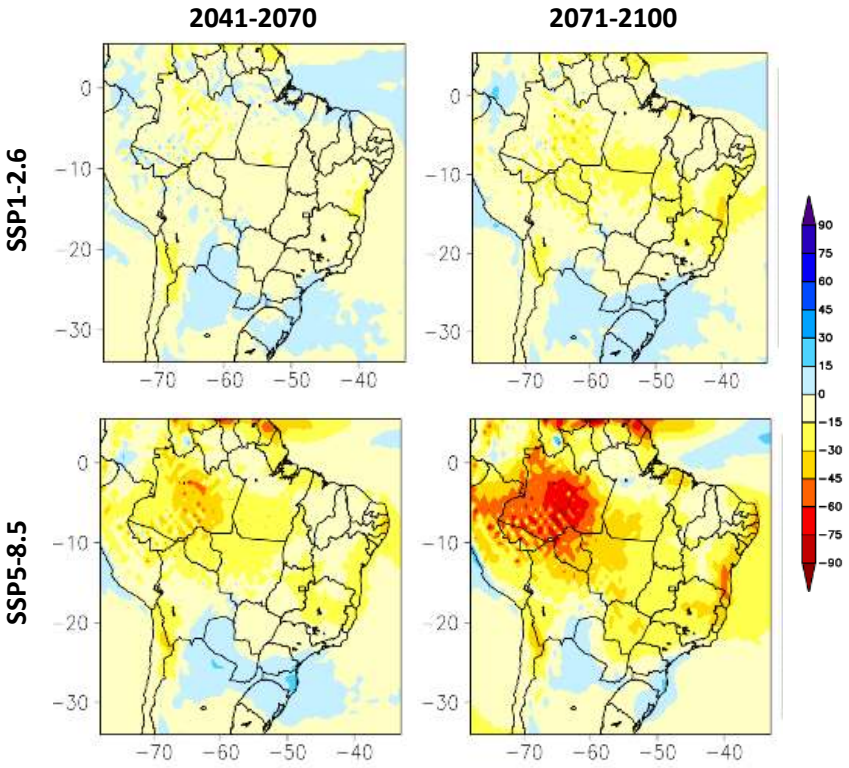
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação ao índice R1mm (Figura 10) no cenário SSP1-2.6, tanto no futuro próximo (2041-2070) quanto no distante (2071-2100), observa-se predomínio de redução em grande parte do país, atingindo valores de 30 dias a menos de chuva no ano em uma faixa noroeste-sudeste entre a Região Norte e o norte da Região Sudeste entre 2071 e 2100. Este padrão espacial é condizente com um enfraquecimento e/ou deslocamento para sul da Zona de Convergência do Atlântico Sul, principal sistema atmosférico responsável pelas chuvas durante a estação chuvosa em grande parte da região tropical do Brasil (Kodama, 1993). Estudos recentes indicam um deslocamento para sul deste sistema atmosférico nos últimos anos, resultando em redução da precipitação entre o sul do Amazonas e a Região Sudeste do Brasil (Zilli *et al.*, 2019; Pascale *et al.*, 2019; Hofmann *et al.*, 2023).

No cenário SSP5-8.5, observa-se uma amplificação da redução do índice R1mm, com maiores diferenças em relação ao período histórico no Amazonas, com 90 dias a menos de chuva no ano no futuro distante (2071-2100). Uma possível explicação para essa redução no Amazonas está associada à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No cenário SSP5-8.5, os modelos projetam um aumento na frequência de eventos extremos da ZCIT

deslocados para norte, em direção a águas mais aquecidas no Atlântico Norte tropical, o que poderá aumentar a frequência de eventos secos no norte da América do Sul, incluindo o estado do Amazonas (Liu *et al.*, 2022).

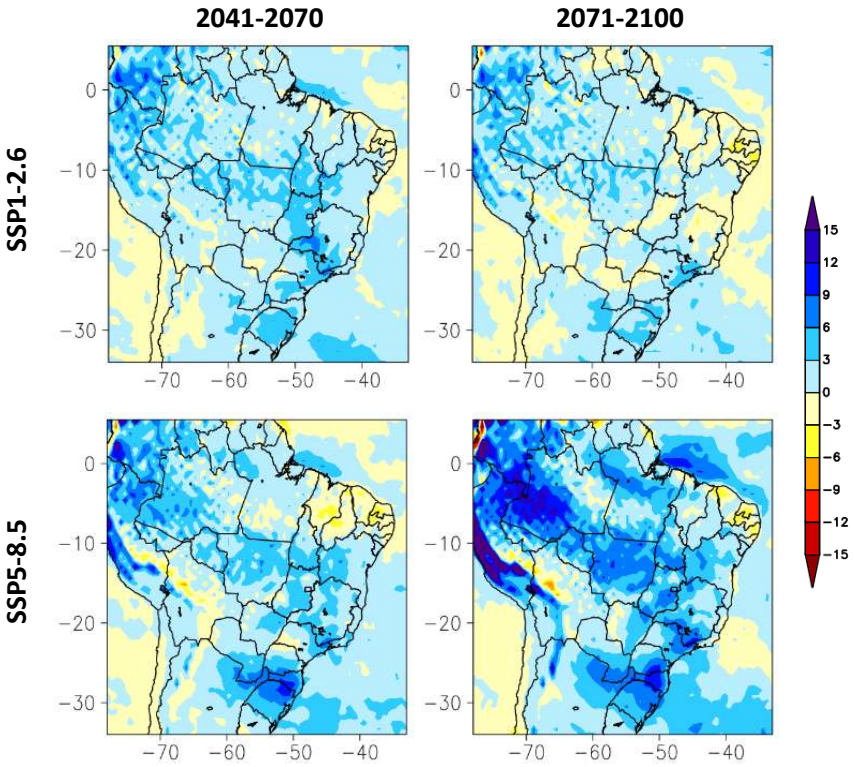
Figura 10 – Índice R1mm (dias): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O R20mm (Figura 11) apresenta aumento em praticamente todo o território brasileiro, em todos os cenários e períodos analisados. O aumento do R20mm no futuro próximo (2041-2070) do cenário SSP1-2.6 é mais intenso, principalmente, no Rio Grande do Sul, na faixa entre o nordeste de São Paulo e Minas Gerais, além do Distrito Federal. Esse padrão se enfraquece no futuro distante (2071-2100). No SSP5-8.5 há um aumento expressivo deste índice no futuro próximo (2041-2070) em grande parte do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (até +12 dias), o qual se intensifica ainda mais nessas regiões no futuro distante (2071-2100), abrangendo também o Paraná e a porção oeste do Amazonas, com valores de +15 dias.

Figura 11 – Índice R20mm (dias): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.

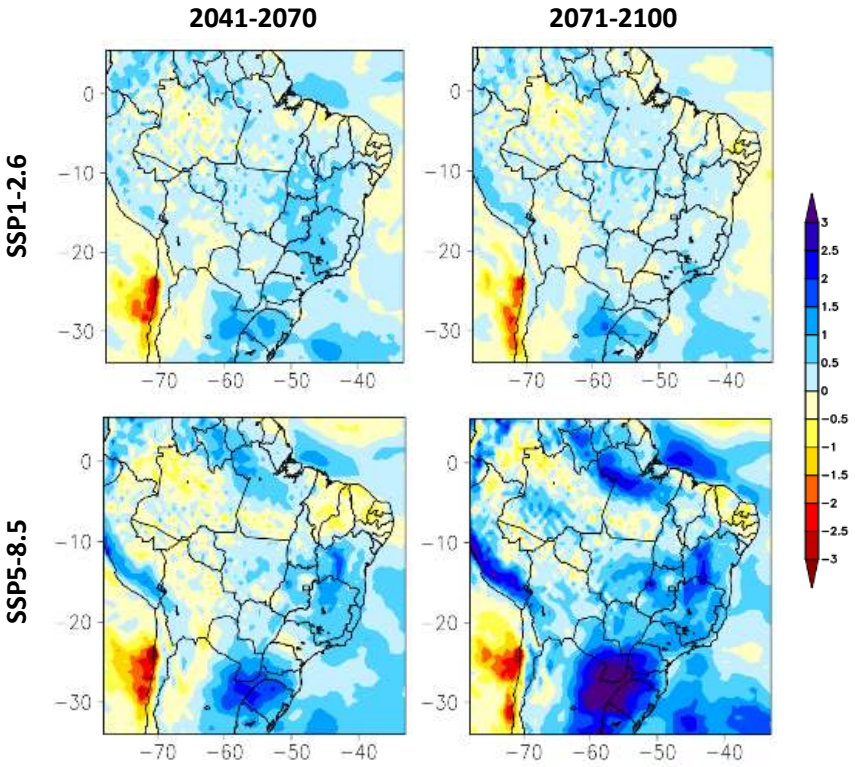


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação ao índice SDII (Figura 12) no cenário SSP1-2.6, tanto no futuro próximo (2041-2070) quanto no distante (2071-2100), predomina aumento em relação ao período histórico, com maiores diferenças no estado do Rio Grande do Sul, de até +1,5 mm/dia. Em relação ao cenário SSP5-8.5, ainda é observado predomínio de aumento do índice SDII sobre o país no futuro próximo (2041-2070) e no distante (2071-2100), com destaque para o oeste da Região Sul, com incrementos superiores a +3 mm/dia.

Estes cenários futuros de intensificação das precipitações são condizentes com o aumento já observado no transporte de umidade da Amazônia em direção aos subtrópicos via jato de baixos níveis da América do Sul (Montini *et al.*, 2019). Este transporte de umidade cria as condições necessárias para a formação e manutenção de sistemas convectivos de mesoescala persistentes (Salio *et al.*, 2007; Moraes *et al.*, 2020). Estes sistemas (*e.g.*, Complexos Convectivos de Mesoescala) geralmente estão associados com chuvas intensas, rajadas de vento, tempestades elétricas, granizo, tornados, dentre outros fenômenos atrelados a impactos (Maddox, 1983; Viana *et al.*, 2009).

Figura 12 – Índice SDII (mm/dia): diferença entre as projeções futuras (2041-2070 e 2071-2100) e o experimento histórico (1981-2010) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As projeções indicam a continuidade ou intensificação de parte das mudanças identificadas no período observado, embora os sinais das alterações variem entre os índices e as regiões. O cenário vivido atualmente, identificado nesse estudo, tende a se intensificar, e por isso esse estudo pode subsidiar debates sobre o enfrentamento das mudanças climáticas no Brasil.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a variabilidade e as mudanças nos índices de extremos de precipitação no Brasil, considerando o período histórico e os cenários futuros de mudanças climáticas. Os resultados da análise decadal (1980-2019) dos dados observados mostraram um padrão de redução da precipitação total anual (índice PRCPTOT) em grande parte do Brasil, assim como um aumento do número de dias secos consecutivos (CDD), particularmente nas Regiões Norte e Centro-Oeste. Associado a esse comportamento, observou-se a redução do número de dias úmidos consecutivos (CWD), especialmente nas Regiões Norte e Nordeste. O

número de dias com chuva (R1mm) e de dias com precipitação ≥ 20 mm/dia (R20mm) também apresentou predomínio de redução no país, especialmente na Região Norte.

As projeções futuras dos índices de extremos de precipitação, obtidas a partir do modelo EC-Earth3-Veg, indicaram os seguintes desvios em relação ao período histórico (1981-2010), considerando o cenário pessimista SSP5-8.5: na Região Sul, aumento do PRCPTOT, R20mm e SDII; na Região Sudeste, aumento do CDD e R20mm, redução do R1mm; na Região Centro-Oeste, redução do CWD e R1mm, aumento do CDD e R20mm; na Região Norte, redução do PRCPTOT, CWD e R1mm, aumento do CDD e R20mm; e na Região Nordeste, redução do R1mm e aumento do CDD.

Essas projeções refletem um cenário climático futuro para o Brasil com períodos secos mais prolongados, redução da frequência de dias chuvosos e extremos chuvosos concentrados. A principal exceção é a Região Sul, onde predominam chuvas mais intensas e frequentes, o que é condizente com as tendências observadas de fortalecimento do transporte de umidade da Amazônia em direção aos subtrópicos via jato de baixos níveis da América do Sul, criando condições favoráveis para o desenvolvimento de sistemas convectivos de mesoescala persistentes. Ressalta-se, entretanto, que a interpretação das projeções deve ser realizada com cautela, uma vez que os resultados incorporam os vieses inerentes ao modelo climático utilizado, os quais não foram corrigidos ou suavizados neste estudo.

Neste contexto, os resultados encontrados no presente estudo indicaram que o Brasil pode enfrentar desafios crescentes em termos de gestão hídrica e adaptação às mudanças climáticas, diante da intensificação das secas e do aumento da frequência de eventos extremos de precipitação em diferentes porções do país, o que aumenta os riscos climáticos e a necessidade de implementação de medidas eficazes de adaptação.

REFERÊNCIAS

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, p. 1403–1426, 2020. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z.

CHEN, D. *et al.* **Framing, Context, and Methods**. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge

University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 147–286, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896.003.

CNM – Confederação Nacional de Municípios. **Sobe para R$ 11 bilhões prejuízo com as chuvas no RS**. Disponível em: https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/sobe-para-r-11-bilhoes-prejuizo-com-as-chuvas-no-rs. Acesso em: 29 maio 2024.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737–3752, 2016. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Climate extreme indices and heat stress indicators derived from CMIP6 global climate projections**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2022. https://doi.org/10.24381/cds.776e08bd Disponível em: https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-extreme-indices-cmip6. Acesso em: 6 jun. 2024.

DÖSCHER, R. *et al.* The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. **Geoscientific Model Development**, v. 15, p. 2973–3020, 2022. https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022.

EYRING, V. *et al.* **Human Influence on the Climate System**. In: Masson-Delmotte, V. et al. (eds.). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 423–552, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896.005.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, art. 873, 2022. https://doi.org/10.3390/atmos13060873.

FIRPO, M. Â. F.; GUIMARÃES, B. S.; DANTAS, L. G.; SILVA, M. G. B.; ALVES, L. M.; CHADWICK, R.; LLOPART, M. P.; OLIVEIRA, G. S. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, art. 948499, 2022. https://doi.org/10.3389/fclim.2022.948499.

GIORGI, F.; RAFFAELE, F.; COPPOLA, E. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. **Earth System Dynamics**, v. 10, n. 1, p. 73–89, 2019. https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019.

GLOOR, M.; BARICHIVICH, J.; ZIV, G.; BRIENEN, R.; SCHÖNGART, J.; PEYLIN, P.; LADVOCAT CINTRA, B. B.; FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; BAKER, J. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 9, p. 1384–1399, 2015. https://doi.org/10.1002/2014GB005080.

GORE, T. **Confronting carbon inequality: putting climate justice at the heart of the COVID-19 recovery**. Oxfam Media Briefing, 2020. Disponível em: https://oxfamilibrary.openrepository.com/handle/10546/621052. Acesso em: 29 abr. 2024.

HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, L. F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, art. 11236, 2023. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x.

KODAMA, Y. M. Large-scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 71, p. 581–610, 1993. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.71.5_581.

LIU, Y.; CAI, W.; LIN, X.; LI, Z. Increased extreme swings of Atlantic intertropical convergence zone in a warming climate. **Nature Climate Change**, v. 12, p. 828–833, 2022. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01445-y.

MADDOX, R. A. Large-Scale Meteorological Conditions Associated with Midlatitude, Mesoscale Convective Complexes. **Monthly Weather Review**, v. 111, p. 1475–1493, 1983. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<1475:LSMCAW>2.0.CO;2.

MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. Características da precipitação na América do Sul reveladas através de índices climáticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020. https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181.

MONTINI, T. L.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, p. 1200–1218, 2019. https://doi.org/10.1029/2018JD029634.

MORAES, F. D. S.; AQUINO, F. E.; MOTE, T. L.; DURKEE, J. D.; MATTINGLY, K. S. Atmospheric characteristics favorable for the development of mesoscale convective complexes in southern Brazil. **Climate Research**, v. 80, p. 43–58, 2020. https://doi.org/10.3354/cr01595.

PAMPUCH, L. A.; BUENO, P. G.; REBOITA, M. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; NUNES, A. M. P.; CARDOSO, A. A.; COELHO, C. A. S.; CARPENEDO, C. B.; VASCONCELOS JUNIOR, F. C.; GOMES, H. B.; PINHEIRO, H. R.; BRAGA, H. A.; BORGES, I. V. G.; CUSTODIO, M. S.; SILVA, M. L.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; SILVA, G. A. M. Brazil climate highlights 2023. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1549, n. 1, p. 120–138, 2025. https://doi.org/10.1111/nyas.15394.

PASCALE, S.; CARVALHO, L. M. V.; ADAMS, D. K.; CASTRO, C. L.; CAVALCANTI, I. F. A. Current and Future Variations of the Monsoons of the Americas in a Warming Climate. **Current Climate Change Reports**, v. 5, p. 125–144, 2019. https://doi.org/10.1007/s40641-019-00135-w.

RAUH, V. A.; LANDRIGAN, P. J.; CLAUDIO, L. Housing and Health: Intersection of Poverty and Environmental Exposures. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1136, p. 276–288, 2008. https://doi.org/10.1196/annals.1425.032.

RIO GRANDE DO SUL. **Situação nos municípios: balanço das enchentes de maio de 2024 no Rio Grande do Sul**. SOS Rio Grande do Sul, 2025. Atualizado em: 19 ago. 2025. Disponível em: https://sosenchentes.rs.gov.br/situacao-nos-municipios. Acesso em: 6 nov. 2026.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1290–1309, 2007. https://doi.org/10.1175/MWR3305.1.

SARASWAT, C.; KUMAR, P. Climate justice in lieu of climate change: a sustainable approach to respond to the climate change injustice and an awakening of the environmental movement. **Energy, Ecology and Environment**, v. 1, p. 67–74, 2016. https://doi.org/10.1007/s40974-015-0001-8.

SENEVIRATNE, S. I. *et al.* **Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate**. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1513–1766, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013.

VIANA, D. R.; AQUINO, F. E.; BRAGA, R. B.; FERREIRA, N. J. Mesoscale convective complexes in Rio Grande do Sul between October and December of 2003 and associated precipitation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 276–291, 2009. https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000300003.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction**. 2nd ed. New York: Academic Press, 2006.

WMO. **The Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019)**. n. 1267, 89 p., 2021. Disponível em: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=documentos/10221.1/83722/1/1267_Atlas_of_Mortality_en-final_-_26.07.2021.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017. https://doi.org/10.1002/joc.4840.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LINTNER, B. R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 52, p. 2545–2563, 2019. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4277-1.