

CAPÍTULO 12

Mudanças Climáticas no Cerrado

Sin Chan Chou

André de Arruda Lyra

Daniela Carneiro Rodrigues

Isabel Pilotto

Jorge Luís Gomes

Pedro Regoto

Priscila da Silva Tavares

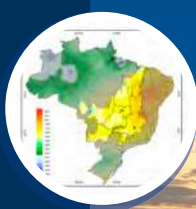


Ilustração: adaptado de INMET (2022)
Fotos: Lineu Rodrigues

12.1 Introdução

A pluviosidade anual acumulada nas regiões do Cerrado varia de cerca de 1,2 mil milímetro na parte leste a 2,2 mil milímetros na parte oeste, enquanto que a temperatura média anual varia de 22 °C na parte sul até cerca de 30 °C na parte norte, segundo a climatologia de 30 anos (1991–2020) do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2022) (Figura 12.1). Na região, existem duas estações bem definidas: os meses mais chuvosos (de novembro a março) e os meses de seca (de maio a setembro). Os 2 meses restantes, outubro e abril, correspondem aos meses de transição. O clima predominante da região enquadra-se no tipo Aw (clima tropical de savana e inverno seco) de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). Durante o período chuvoso, os valores mais altos de precipitação são encontrados na porção oeste do bioma, notadamente no estado de Mato Grosso e na porção litorânea do estado do Maranhão.

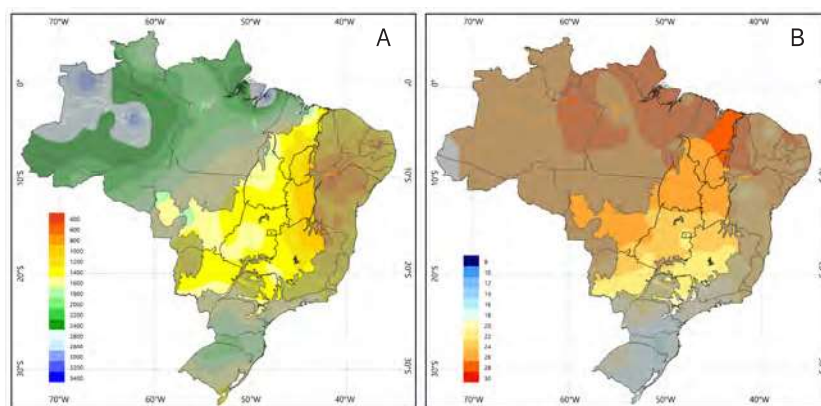


Figura 12.1. Normais climatológicas do Brasil de 1991–2020 para precipitação anual acumulada (mm) (A) e temperatura média compensada (°C) (B). Os limites do Cerrado estão em destaque.

Fonte: Adaptado de Inmet (2022).

Nos últimos anos, as variações climáticas e mudanças no clima têm sido frequentemente discutidas pela comunidade científica e pela população em geral. Considera-se mudanças climáticas as alterações na variabilidade natural do clima devido às atividades humanas ou fontes antropogênicas, como liberação de Gases de Efeito Estufa (GEE), mudanças no uso e cobertura do solo e desmatamento, entre outras. Em 2021, foi lançado o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). O relatório mostra o aquecimento global em cerca de 1 °C em relação ao período pré-industrial e é categórico em afirmar que este aquecimento em curto período de tempo é devido às ações antrópicas.

Para descrever o clima de várias décadas à frente, é necessário o uso de modelos climáticos dinâmicos que reproduzam o sistema climático terrestre. Diferente de uma previsão de tempo, as projeções climáticas, devido ao longo horizonte temporal (décadas), consideram diferentes cenários mundiais de desenvolvimentos socioeconômicos e mudanças tecnológicas que resultam em diferentes cenários de emissão dos GEE. Portanto, a principal ferramenta utilizada para simular o clima futuro, supondo diferentes cenários de emissão dos GEE, são os Modelos Climáticos Globais (MCGs). As tendências de longo prazo podem variar substancialmente de um local para outro (até dentro da mesma bacia hidrográfica) e os MCGs, devido a sua baixa resolução espacial, não capturam facilmente as variações temporais e espaciais detalhadas em uma escala local ou regional. Portanto, o estudo dos impactos locais das mudanças climáticas globais necessita de detalhamento das projeções dos modelos globais a partir de regionalização (downscaling) dinâmica ou estatística. Os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) podem ser usados para regionalizar as saídas dos MCGs de grande escala para uma resolução espacial mais refinada.

Uma questão a ser destacada nos estudos das mudanças climáticas é o possível aumento na ocorrência de eventos climáticos extremos. Tais eventos geralmente geram grandes impactos no ambiente

e na sociedade, incluindo perdas humanas e materiais. Esses eventos podem ocorrer, por exemplo, na forma de chuvas muito intensas, ou extremamente reduzidas, secas prolongadas, temperaturas extremamente altas, maiores riscos de incêndios, redução da disponibilidade hídrica, entre outros. Por outro lado, também podem trazer oportunidades tais como a possibilidade de maior fonte de energia solar e consequentemente de energia fotovoltaica, ou maior energia eólica, entre outros. Identificar os riscos e as oportunidades é o primeiro passo para construir medidas de adaptação às mudanças climáticas.

Com o objetivo de analisar as mudanças climáticas no Cerrado, este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte são apresentados estudos observacionais de mudanças na temperatura, precipitação e umidade relativa, com foco no Cerrado brasileiro. As mudanças são apresentadas na forma de tendências das últimas décadas. Na segunda parte são apresentadas as projeções de mudanças climáticas para as décadas futuras. As tendências observadas até o presente podem não se manter nas décadas futuras. Os impactos na mudança do bioma devido aos efeitos climáticos também são considerados. Ao final do capítulo, são traçadas algumas considerações sobre as mudanças climáticas no Cerrado.

12.2 Mudanças observadas

12.2.1 Temperatura do ar

Nesta seção, será dada ênfase ao percentil 90 das temperaturas máximas (TX90p) e ao percentil 10 das temperaturas mínimas (TN10p). Dessa forma, cada estação meteorológica na área do Cerrado possui um valor individual das temperaturas TX90p e TN10p.

Almeida (2012) utilizou séries observadas das estações meteorológicas do INMET para analisar a tendência dos extremos de temperatura no Centro-Oeste do Brasil. As séries possuem tamanhos variados, desde 24 anos até 50 anos, com início diferentes, mas a maioria com o final em 2011. Na área que se refere ao Cerrado, as tendências das

temperaturas máximas que excedem o percentil 90 se apresentaram positivas com alta significância estatística, portanto, pode-se afirmar com confiança que as temperaturas que excedem TX90p estavam se tornando mais frequentes no período estudado. A série da única estação que apresentou tendência negativa também não apresentava significância estatística. Por outro lado, as tendências das temperaturas inferiores a TN10p, estavam se tornando mais frequentes no período estudado, entretanto, a significância estatística era menor em comparação com o índice das temperaturas máximas.

Em uma análise específica para Brasília, DF, Almeida (2012) observou que as temperaturas mínimas estão aumentando em uma taxa maior do que as temperaturas máximas, o que está reduzindo a amplitude térmica na cidade. Esse resultado concorda com os encontrados por Salvador e Brito (2018) para a região do Matopiba, em que utilizando séries de temperaturas máximas e mínimas para o período de 1970 a 2012, encontraram tendência de aumento na frequência de temperaturas máximas e mínimas que excedem o percentil 95.

Utilizando séries observadas de temperatura das estações do INMET, porém abrangendo o período de 1961 a 2017, totalizando assim 57 anos, Regoto et al. (2021) estimaram a magnitude das tendências do TX90p e do TN10p para cada estação meteorológica (Figura 12.2). Os resultados revelam, em grande parte do Cerrado, um aumento estatisticamente significativo da frequência do TX90p de cerca de 5 a 10% por década (Figura 12.2A). Palmas é a cidade do Cerrado com a maior tendência de aumento na frequência do TX90p, a qual ultrapassa os 10% por década. Em relação ao TN10p, os resultados indicam que tendem a ser menos frequentes (Figura 12.2B). Na parte nordeste e sudeste do Cerrado, predomina a tendência de redução do TN10p de 0,1 a 5% por década, enquanto que na parte que abrange Tocantins e Mato Grosso, predomina tendência maior de redução, com várias estações apresentando tendência estatisticamente significativa superior a 10% por década.

As temperaturas no Cerrado podem ser alteradas pelo aumento global dos GEE bem como pela alteração do uso do solo. A contribuição de cada efeito nas mudanças da temperatura não é clara, mas se nota que regiões como Tocantins e Mato Grosso, onde há forte urbanização e culturas agrícolas substituindo o bioma Cerrado, apresentam as maiores tendências seja no aumento das temperaturas máximas, seja na redução das temperaturas mínimas.

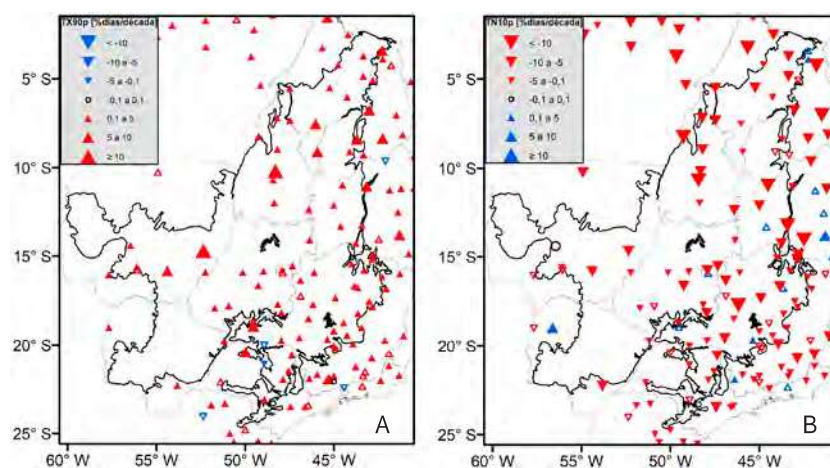


Figura 12.2. Tendência anual observada das temperaturas máximas TX90p (A) e das temperaturas mínimas TN10p (B) no Cerrado considerando o período de 1961 a 2017.

Fonte: Adaptado de Regoto et al. (2021).

A tendência de aumento da temperatura média anual tem sido observada no Cerrado a partir de diferentes conjuntos de dados de temperatura ou diferentes recortes temporais. Penereiro et al. (2018) utilizaram dados do INMET de diferentes tamanhos considerando o período de 1961–2015 e encontraram tendência positiva na temperatura média em todas as estações do ano. Correa et al. (2022), utilizando o conjunto de dados do Climatic Research Unit (CRU) (Harris et al., 2020), identificaram que a tendência mais acentuada de aumento da temperatura média ocorreu nos estados de Tocantins e Goiás, entre 1985 e 2014, o qual chegou a 1,16 °C.

12.2.2 Precipitação

Almeida (2012) utilizou dados observados do INMET também para analisar índices extremos de chuva em localidades do Centro-Oeste brasileiro. No Cerrado, o inverno (junho, julho e agosto) é a estação que apresenta longos períodos sem chuva. A qualidade do regime das chuvas pode ser representada pelo índice de contagem de dias consecutivos máximos sem chuva em cada ano, do inglês *Consecutive Dry Days* (CDD), podendo indicar se o período seco é longo ou curto. Esse índice apresentou tendência de aumento em grande parte do Cerrado. Esse resultado também foi encontrado por Regoto et al. (2021), que mostraram aumento pequeno em grande parte do Cerrado, mas aumentos estatisticamente significativos no Cerrado do noroeste de Minas Gerais (Figura 12.3A). Isso significa que ao longo dos últimos anos se observou um aumento na duração do período de estiagem. Além disso, análises de dados históricos de precipitação na bacia do rio São Francisco, que abrange boa parte do leste do Cerrado, mostram um declínio de totais de chuva em mais de 25% em relação à média de longo prazo de 1961–1990 (Jong et al., 2018).

Outra caracterização das chuvas pode ser representada pelo índice de número de dias consecutivos chuvosos em um ano, do inglês *Consecutive Wet Days* (CWD). Os resultados de Almeida (2012) mostraram tendências desse índice predominantemente negativas no oeste de Minas Gerais, leste, norte e sudoeste de Goiás. Entretanto, os resultados apresentados em Regoto et al. (2021) indicam que as tendências negativas são pequenas e sem significância estatística; sendo predominantemente nula (círculos) em várias partes do Cerrado, principalmente no Mato Grosso do Sul (Figura 12.3B). Nesse contexto, os resultados de Regoto et al. (2021) apontam que, na maior parte do Cerrado, a duração dos períodos de dias consecutivos chuvosos no clima presente permanece constante.

Levando em consideração a intensidade, as chuvas que se acumulam em grandes volumes ao longo de um único dia frequentemente são responsáveis por desencadear desastres, tais como inundações

ou deslizamentos de terra. Para acompanhar as chuvas diárias de alta intensidade, pode-se adotar como limiar os percentis 95 ou 99 das chuvas do conjunto de 30 anos. Os índices R95p ou R99p representam o acumulado do volume de chuvas que excedem os percentis 95 ou 99, respectivamente, em cada ano. Almeida (2012) encontrou tendências estatisticamente positivas desses índices em diversas partes do Cerrado. Em Regoto et al. (2021), a tendência do índice R95p concorda na parte sul do Mato Grosso do Sul, também com alta significância estatística, entretanto, nas demais regiões, há localidades com tendência de redução próximas de outras com aumento, não mostrando um sinal de tendência predominante na região como um todo (Figura 12.3C).

O total de chuva acumulada no ano é um índice comumente utilizado para identificar anos secos e anos chuvosos. Nos resultados de Almeida (2012), o índice que representa o total de chuva anual mostrou predomínio de tendências de aumento no Centro-Oeste, mas sem significância estatística. Entretanto, nos resultados de Regoto et al. (2021) (Figura 12.3D), a tendência foi de redução da chuva total anual na maior parte do Cerrado. A tendência de aumento das chuvas foi encontrada na parte sul do Cerrado, no Mato Grosso do Sul e na região da divisa entre São Paulo e Minas, com significância estatística, e partes do Maranhão, sem significância estatística. A região Centro-Oeste se destaca com uma das áreas no Brasil com menor disponibilidade de dados observacionais in situ, o que dificulta análises mais abrangentes das mudanças significativas na região.

Há localidades como, por exemplo, no noroeste de Minas Gerais, em que se observou tendência de redução das chuvas totais anuais e redução de dias chuvosos consecutivos, isto é redução no CWD, além de aumento na duração da estiagem, aumento no CDD, por outro lado, as chuvas intensas R95p tendem a aumentar (Figura 12.3). Consequentemente, é possível deduzir que em determinadas áreas do Cerrado, como no noroeste de Minas Gerais, as chuvas estão se tornando mais concentradas em períodos de tempo mais curto, acompa-

nhadas de períodos de estiagem mais prolongados. Isso pode ter um impacto negativo na biodiversidade e nos recursos hídricos. O que tem refletido na região no aumento do conflito pelo uso da água.

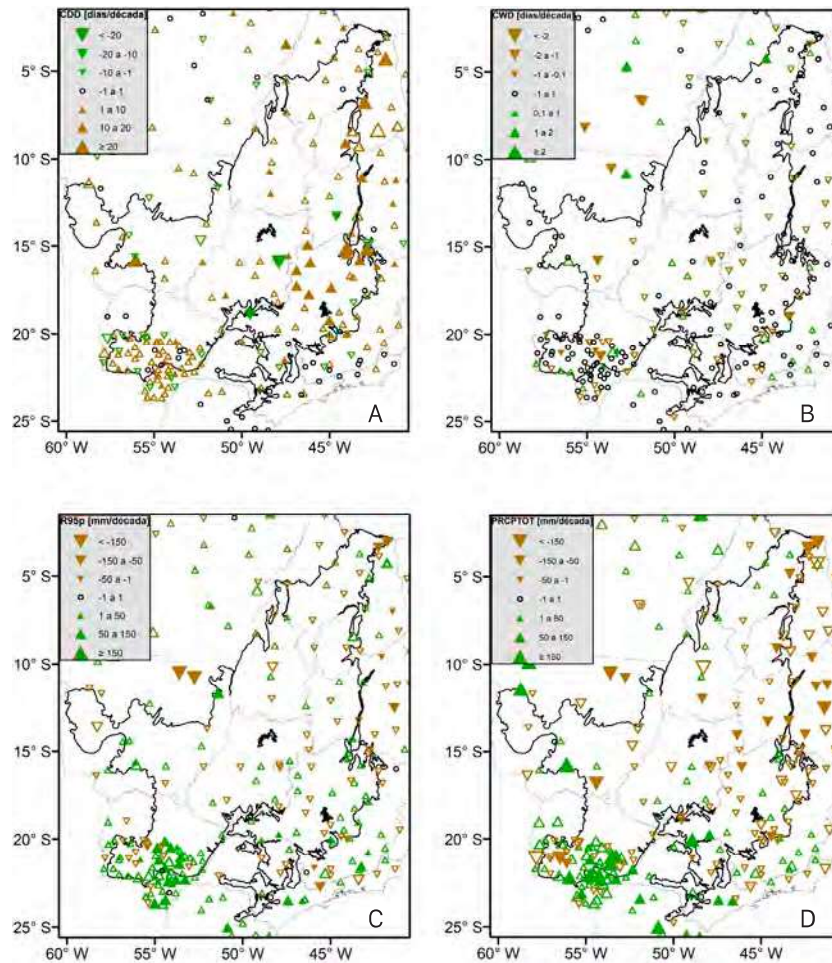


Figura 12.3. Tendência anual observada de número de dias secos consecutivos (A). CDD, número de dias chuvosos consecutivos (B). CWD, acumulados de chuva acima do percentil 95 (C). R95p, precipitação total anual (D), no Cerrado no período de 1961–2017.

Fonte: Adaptado de Regoto et al. (2021).

Uma informação útil para compor as análises da distribuição das chuvas ao longo do ano e avaliar o possível prolongamento dos períodos de estiagens consiste na identificação do início do período climatologicamente seco (chuvoso); e se o mesmo está adiantando (atrasando). Em estudo realizado por Costa e Pires (2010), os autores demonstraram que o desmatamento do Cerrado no entorno do arco do desflorestamento aumentou a duração da estação seca de cinco para seis meses.

O Índice de Precipitação Padronizada, do inglês Standardized Precipitation Index (SPI), e o Índice de Evapotranspiração e Precipitação Padronizado, do inglês Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010a, 2010b), são frequentemente utilizados para identificar extremos de precipitação. O SPI é calculado a partir da precipitação acumulada em diferentes escalas de tempo, enquanto que o SPEI é semelhante ao SPI, mas considera a evapotranspiração para identificar eventos extremos. Tomasella et al. (2023) utilizaram uma base longa de dados climatológicos (1980–2019) (Xavier et al., 2022), sobre o Brasil e estimaram o SPI e o SPEI para identificar os eventos climáticos extremos, seco ou úmido no Cerrado. Os autores verificaram, com significância estatística, que existem tendências negativas tanto no SPI quanto no SPEI durante o período 1980–2019 na maior parte do Brasil Central. A tendência negativa é mais intensa no SPEI pelo aumento da evaporação associado às temperaturas mais altas. No Centro-Oeste, onde está localizada grande parte do Cerrado, verificaram tendências negativas significativas para a precipitação e positivas para a evapotranspiração.

Diante dos resultados mencionados, há indicativos de que as chuvas estão se tornando mais concentradas em períodos de tempo mais curto, e os períodos de estiagem se tornando mais longos no Cerrado. Em geral, os trabalhos com dados observacionais verificaram uma maior concordância sobre o aumento da temperatura na região do

Cerrado, enquanto que as tendências da precipitação apresentam mais divergências em parte causadas pelas diferentes bases de dados, períodos considerados e metodologias adotadas.

12.2.3 Umidade relativa

A variável meteorológica umidade relativa tem relevância no Cerrado devido aos valores muito baixos encontrados na região por períodos longos. A baixa umidade relativa provoca problemas respiratórios e aumenta a evapotranspiração da biosfera, reduzindo a disponibilidade hídrica nessas condições.

Almeida (2012) analisou a série histórica da umidade relativa sobre o Centro-Oeste e observou o predomínio na região de tendência positiva (aumento) no número de dias nos quais a umidade relativa do ar permaneceu abaixo dos 30%, na grande maioria com significância estatística. Esse padrão foi verificado principalmente nas estações de inverno e primavera. A tendência de maior frequência de umidade relativa abaixo de 30% é consequência da tendência observada de aumento das temperaturas máximas e de redução na precipitação sobre a região. Os índices, baseados na quantidade de dias (UR30) e na duração dos dias consecutivos (DCUR30) nos quais a umidade relativa do ar ficou abaixo de 30%, mostraram que a região Centro-Oeste vem apresentando anualmente um aumento no número de dias secos (UR30) e na duração de períodos secos (DCUR30) com umidade relativa do ar abaixo de 30%.

Adicionando os dados MODIS às estações meteorológicas na região do Cerrado entre os anos 2000 e 2019, Hofmann et al. (2021) encontraram que nos meses secos, de julho a outubro, a tendência de aumento das temperaturas ao longo dos anos favoreceu o maior conteúdo de vapor d'água no ar, entretanto, acarretou em tendência de redução da umidade relativa. Além disso, as tendências de mudança eram mais significativas no período diurno do que noturno.

12.3 Projeções de mudanças climáticas

Modelos climáticos estão sujeitos a incertezas, especialmente em projeções climáticas de longo prazo em escala regional. Portanto, análises considerando diferentes modelos e cenários são práticas recomendadas para analisar as projeções de mudanças climáticas. Devido à impossibilidade de identificar o cenário que ocorrerá, são apresentados os cenários mais pessimistas, de alta emissão, e otimistas, de baixa emissão de GEE, na forma de intervalo ou faixa de valores em que a mudança pode ocorrer. A partir das projeções climáticas resultantes da combinação dos quatro modelos globais do Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): BESM (Nobre et al., 2013), CanESM2 (Chylek et al., 2011), HadGEM2-ES (Collins et al., 2011) e MIROC5 (Watanabe et al., 2010), e de dois cenários de concentração de GEE, RCP4.5 e RCP8.5 (Moss et al., 2010), geraram a combinação de oito projeções climáticas globais. Essas projeções foram regionalizadas para uma grade de resolução de 20 km sobre a América do Sul utilizando o Modelo Eta/INPE (Pesquero et al., 2010; Chou et al., 2012; Mesinger et al., 2012; Chou et al., 2014a).

O fenômeno El Niño/La Niña, caracterizado por aquecimento anômalo das águas do Oceano Pacífico Equatorial Central, impacta fortemente o clima global. Durante os eventos de El Niño, a parte norte do Cerrado apresenta redução das chuvas. Entretanto, os modelos climáticos globais apresentam muitas incertezas nas projeções da amplitude do fenômeno no futuro. Em geral, em cenários de maior aquecimento global, RCP8.5 ou SSP5-8.5, as projeções indicam que o fenômeno se torna mais intenso, enquanto que em cenários moderados RCP4.5 ou SSP2-4.5, as projeções não mostram mudança na amplitude do fenômeno (Beobide-Arsuaga et al., 2021).

A seguir, são apresentadas as projeções de mudanças na temperatura, precipitação e disponibilidade hídrica no bioma Cerrado. Esses resultados distinguem-se de Chou et al. (2014b) por incluírem mais

um modelo climático global e por conterem correção de viés (Tavares et al., 2023b) pelo método de mapeamento quantil empírico (Bárdossy; Pegram, 2011) aplicado nas variáveis precipitação e evapotranspiração. As comparações de aumento ou redução dos percentis referem-se às comparações com o valor do percentil do clima presente em cada caixa da grade na área do Cerrado. Por exemplo, se o valor do percentil 90 das temperaturas máximas, TX90p, de uma localidade no clima presente é 30 °C, nas projeções do clima futuro serão mostradas a frequência em que as temperaturas máximas excedem ou são inferiores a 30 °C.

12.3.1 Temperatura

As projeções de mudanças de temperatura no Cerrado são apresentadas em médias para 5 décadas: 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090. Os limites inferior e superior das mudanças de temperatura média do ar (°C), e dos índices extremos TN10p e TX90p em cada década foram extraídos de oito projeções construídas a partir do downscaling com o Modelo Eta. Entre as oito projeções, resultantes da regionalização dos quatro modelos globais e dois cenários de emissão, e em cada caixa de grade do modelo, a mudança de maior valor foi atribuída ao limite superior e a mudança de menor valor atribuído ao limite inferior, o que resultou nos mapas da Figura 12.4.

Em geral, as magnitudes das mudanças máximas e mínimas apresentam a tendência de aumento a cada década. Na primeira década (2041–2050), os limites inferiores das mudanças de temperatura média anual variam entre 0,5 a 1,5 °C e os limites superiores das mudanças variam entre 2 a 4 °C sobre o Cerrado (Figura 12.4). A última década (2081–2090) se apresenta como o período com maior aquecimento, as mudanças máximas atingem o aquecimento acima de 5 °C sobre toda a área do Cerrado. Em quase todas as décadas, as mudanças de temperatura têm intensidade menor na parte norte do Cerrado e se intensificam em direção à parte sudoeste.

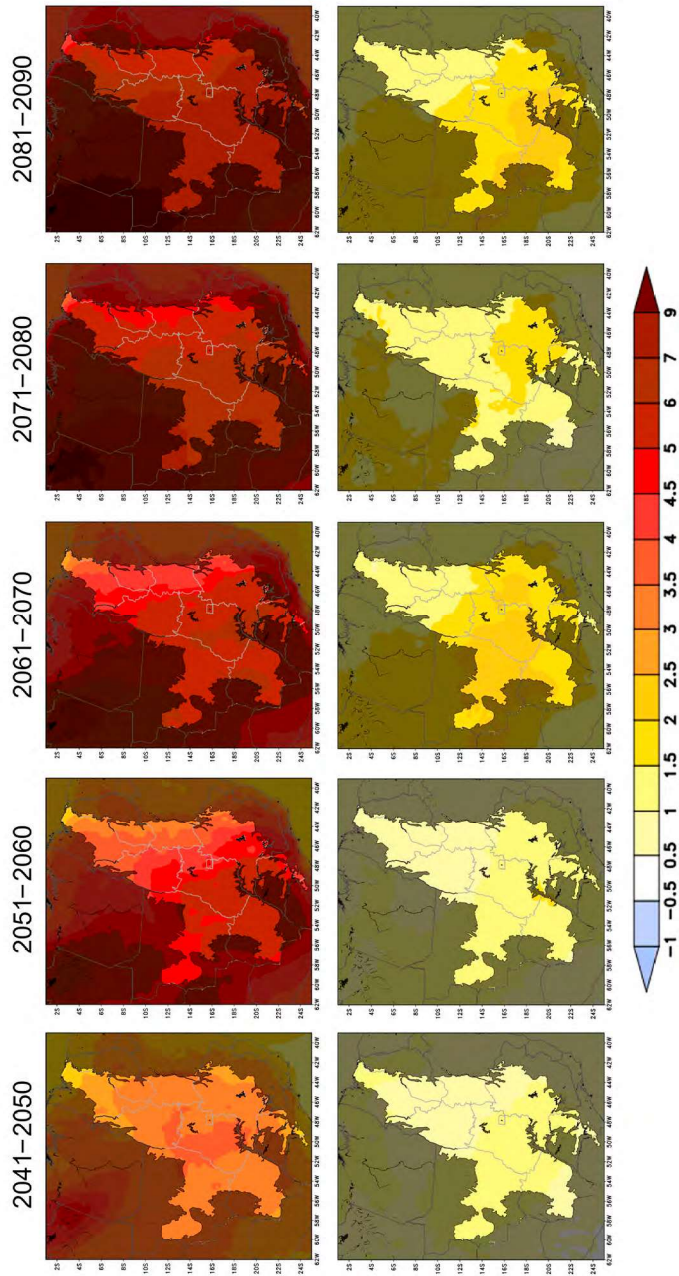


Figura 12.4. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na temperatura média anual (°C) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas de 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090, em relação à climatologia do modelo de 1976–2005.

Assim como em Regoto et al. (2021) com dados observados no clima presente, as projeções para o clima futuro indicam também tendência de redução na frequência das menores temperaturas mínimas em relação ao TN10p do clima presente, e tendência de aumento na frequência das maiores temperaturas máximas em relação ao TX90p do clima presente. Essa redução na frequência de temperaturas mínimas menores que TN10p do presente está compreendida no intervalo de -2 a -8% em todas as décadas. As maiores reduções na frequência de temperaturas mínimas menores que o TN10p do presente são notadas na parte Sul e Leste do Cerrado (Figura 12.5). Portanto, estas projeções indicam que as menores temperaturas mínimas ocorreram com menos frequência, o que resulta do aquecimento global.

Por outro lado, os aumentos nas frequências das maiores temperaturas máximas são mais expressivos do que a redução das menores temperaturas mínimas na região. As projeções indicam que no clima futuro, a frequência de temperaturas máximas maiores que o TX90p do presente aumentam desde de 20 a 80% na maioria das regiões do Cerrado (Figuras 12.6). Este aumento é maior na parte Noroeste do Cerrado e se expande para todo o Cerrado na última década, quando são notados limiares superiores entre 80 e 100%.

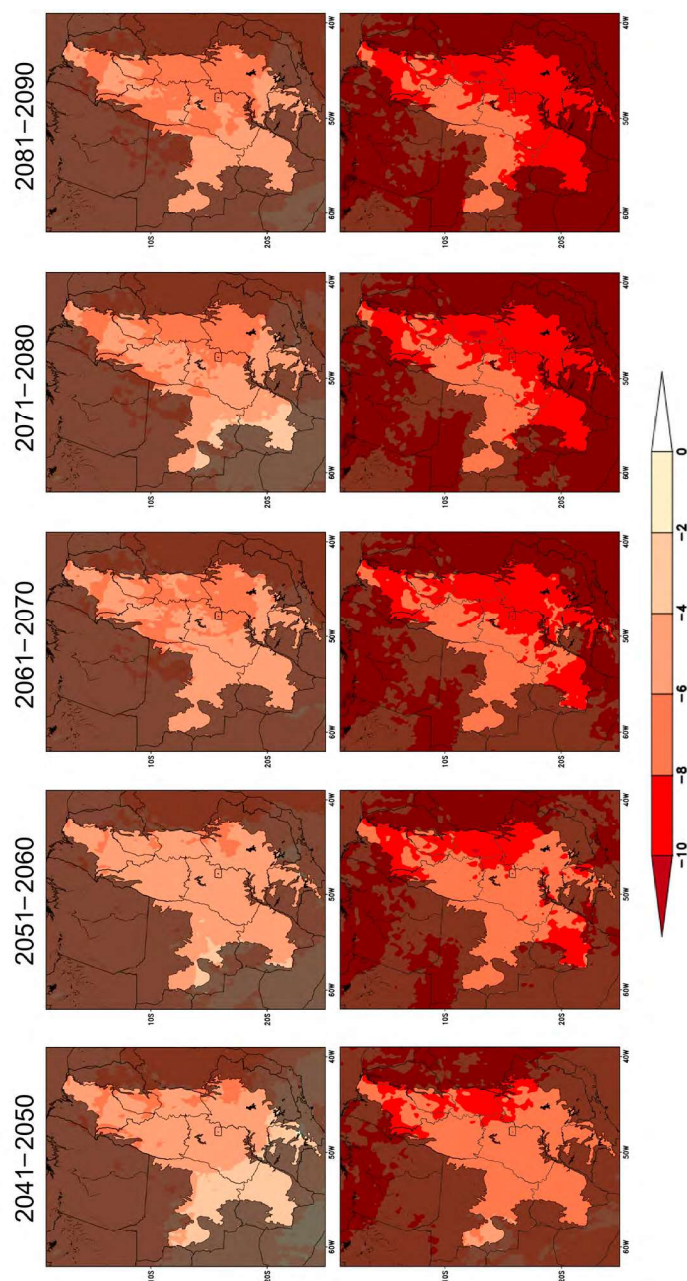


Figura 12.5. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na frequência de temperaturas mínimas menores que a TN10p do presente (%) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090, em relação a climatologia do modelo de 1976–2005.

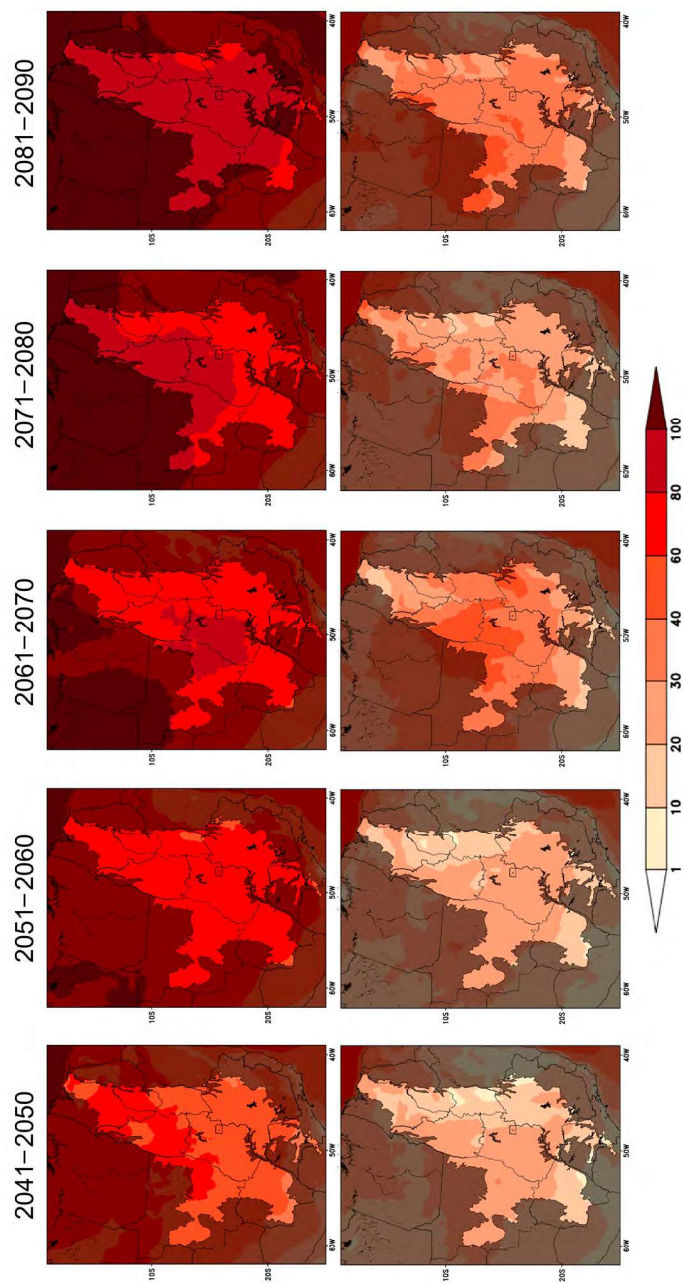


Figura 12.6. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na frequência das temperaturas máximas maiores que TX90p do presente (%) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005.

12.3.2 Precipitação

As projeções a seguir mostram a amplitude das mudanças da precipitação a partir das oito projeções do Modelo Eta descrito acima. Com base no conjunto do downscaling dos quatro modelos globais e os dois cenários de emissão, extraíram-se os limites inferior e superior das mudanças da precipitação projetada para a região.

As mudanças do máximo anual de dias consecutivos sem chuva, o índice CDD, extraído do conjunto das oito projeções, para o período de 2041 a 2090, fatiadas em décadas são mostradas na Figura 12.7. Os tons avermelhados indicam aumento no número de dias sem chuva consecutivos e os tons azulados indicam a redução do CDD do futuro em relação ao CDD do clima presente de 1976–2005. Nota-se que entre as oito projeções, as mudanças na duração de estiagem podem desde reduzir a até aumentar. Verifica-se que no norte do Cerrado, entre Maranhão e Piauí, há um aumento maior na duração das estiagens, mesmo os limites inferiores já indicam aumento de cerca de 10 dias, e os limites superiores excedem 50 dias. Quando se analisa o sinal das mudanças entre as projeções (terceira linha), nota-se que a partir da década de 2051–2060, a maioria das projeções concordam com o sinal positivo de CDD, ou seja de aumento do número de dias sem chuva consecutivos ao ano, portanto, aumento na duração máxima da estiagem a cada ano. A partir da década de 2051–2060, também se verifica que o aumento do índice CDD é mais expressivo do que a redução de CDD anual (limite inferior).

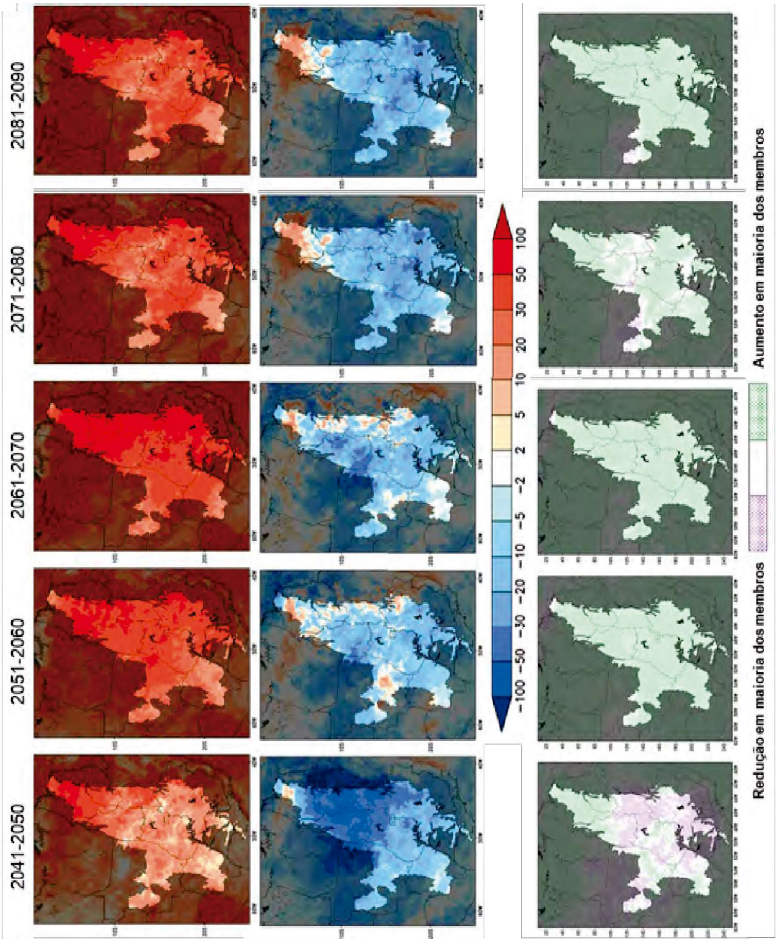


Figura 12.7. Limites superiores (linha superior) e inferiores (segunda linha) das mudanças no número de dias consecutivos de estiagem máximo anual (CDD) no Cerrado. São mudanças médias projetadas pelo Modelo Eta dos climas nas décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação ao clima de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

Na Figura 12.8, mostra-se as mudanças na máxima duração anual dos dias consecutivos chuvosos, isto é, são mudanças do índice CWD. As mudanças são médias a cada década em relação ao clima presente de 1976–2005. Os tons avermelhados indicam redução do índice CWD e os tons azulados indicam aumento do CWD. Na maior parte do Cerrado, as projeções indicam as possibilidades de os dias consecutivos chuvosos reduzir em cerca de 10 dias e até aumentar em cerca de 50 dias. Em uma área do Cerrado situada entre aproximadamente 10 °S e 6 °S, nota-se aumento no número de dias consecutivos chuvosos, CWD, em todas as décadas em relação ao clima presente. Contudo, considerando o sinal da mudança, há uma alta variabilidade entre as décadas. Em geral, a maioria das projeções do Modelo Eta apresenta predomínio do aumento na duração de dias chuvosos na década de 2041–2050, mas inverte para o predomínio de redução na duração de dias chuvosos na década de 2061–2070, e volta o aumento na década de 2071–2080.

As projeções de mudanças nas chuvas extremas, chuvas que excedem a taxa do percentil 95, R95p, do clima presente, apresentam desde redução a aumento destas chuvas (Figura 12.9). Alta variabilidade decadal também é mostrada. Enquanto que na década de 2041–2050, predomina o aumento nas chuvas extremas no Cerrado, com concordâncias entre as projeções, nas décadas de 2051–2060 e 2061–2070, predomina a redução das chuvas extremas no Cerrado, com maioria entre as projeções e, na década de 2071–2080, volta o aumento das chuvas. O padrão de mudanças se mantém no final do século, 2080–2099, mas em maior intensidade.

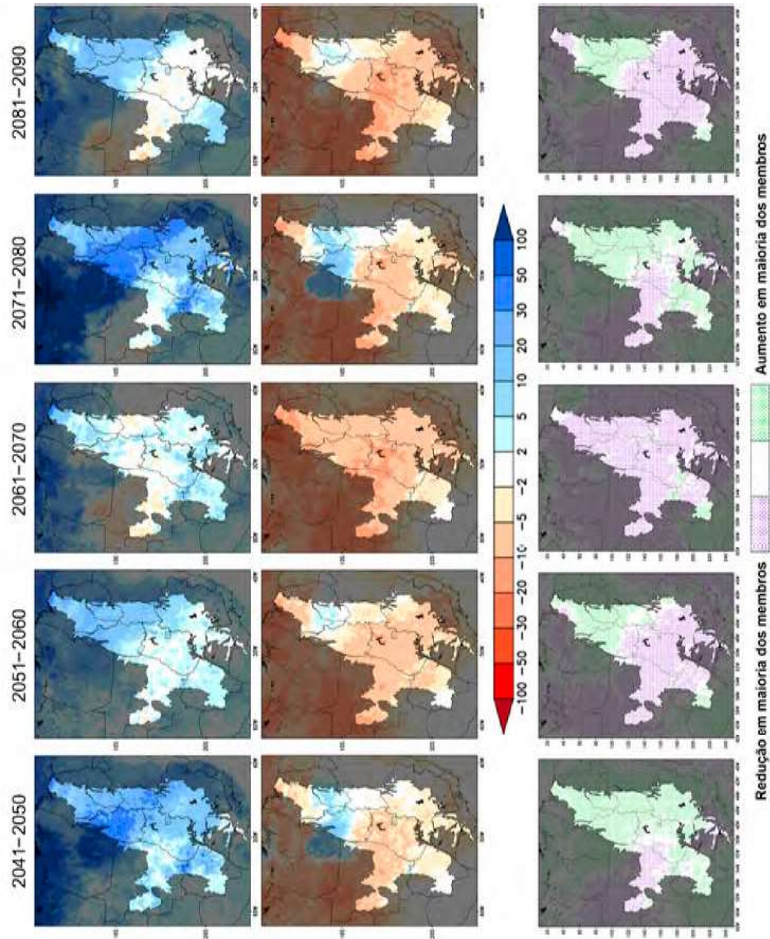


Figura 12.8. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças no número de dias consecutivos chuvosos máximo anual (CWD) no Cerrado. São mudanças médias projetadas pelo Modelo Eta dos climas das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação ao clima de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

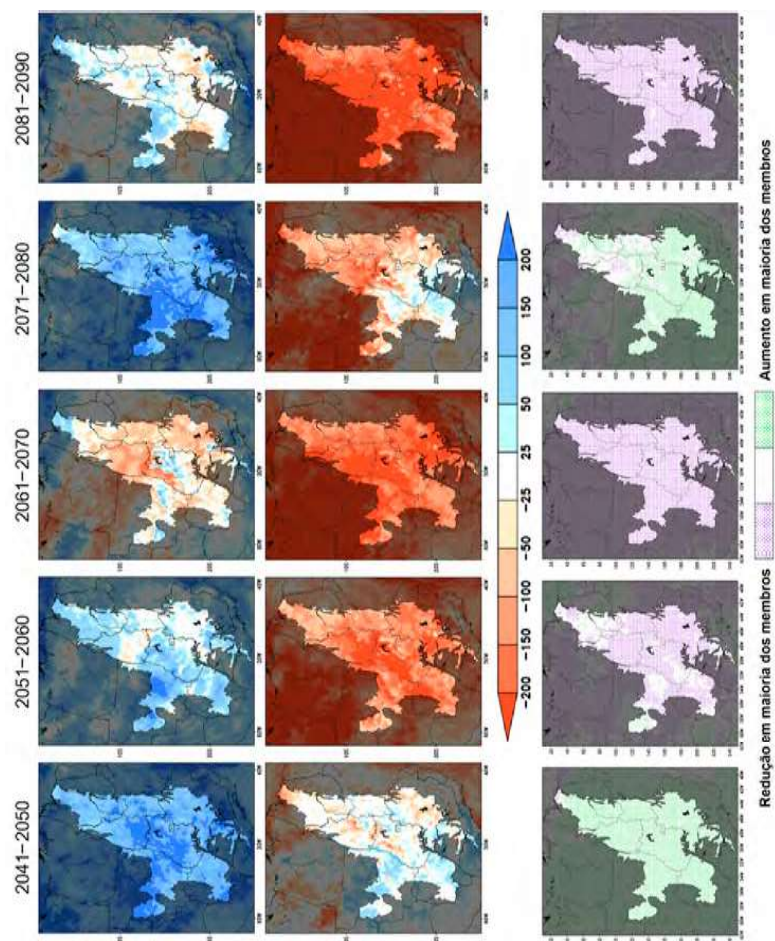


Figura 12.9. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças nas chuvas extremas (mm/ano) que excedem o R95p do clima presente no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

Essas diferenças de sinal entre os limites superiores e inferiores do intervalo das mudanças indicam uma divergência entre os dois cenários de emissão. Os sinais opostos dos limites superiores e inferiores e alta variabilidade decadal das projeções de chuvas extremas também ocorrem nas projeções da chuva total anual (Figura 12.10). O sinal de aumento da chuva anual predomina no Cerrado na década de 2041–2050 e é maioria das projeções do modelo. Entretanto, nas décadas 2051–2060, 2061–2070 e 2081–2090, a maioria das projeções do modelo Eta passa a indicar redução da chuva total anual. Na década de 2071–2080, há sinais mistos no Cerrado, mas com predomínio de redução da chuva anual na parte oeste. Nota-se que em regiões do Cerrado, onde as projeções indicam na maioria redução da chuva anual, as projeções também indicam aumento das chuvas extremas em relação a R95p, portanto, chuvas mais concentradas quando ocorrem.

As projeções para a América do Sul realizadas por Llopart et al. (2020), embora não abranjam especificamente a região do Cerrado, indicam um aumento das chuvas no período de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e uma redução no inverno (junho, julho, agosto) no final do século, 2070–2100, com significância estatística. Essas projeções foram realizadas utilizando os cenários RCP8.5 e RCP4.5.

Além disso, as projeções dos modelos climáticos globais do Coupled Models Intercomparison Project 6 (CMIP6) indicam uma forte redução da chuva anual na parte noroeste e oeste do Cerrado, mas um aumento na parte leste durante as décadas de 2040–2059 (Almazroui et al., 2021). Essas mudanças são projetadas nos quatro cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 (Riahi et al., 2017), que variam de baixa a alta emissão, respectivamente. A área de redução das chuvas se expande para leste no cenário SSP5-8.5.

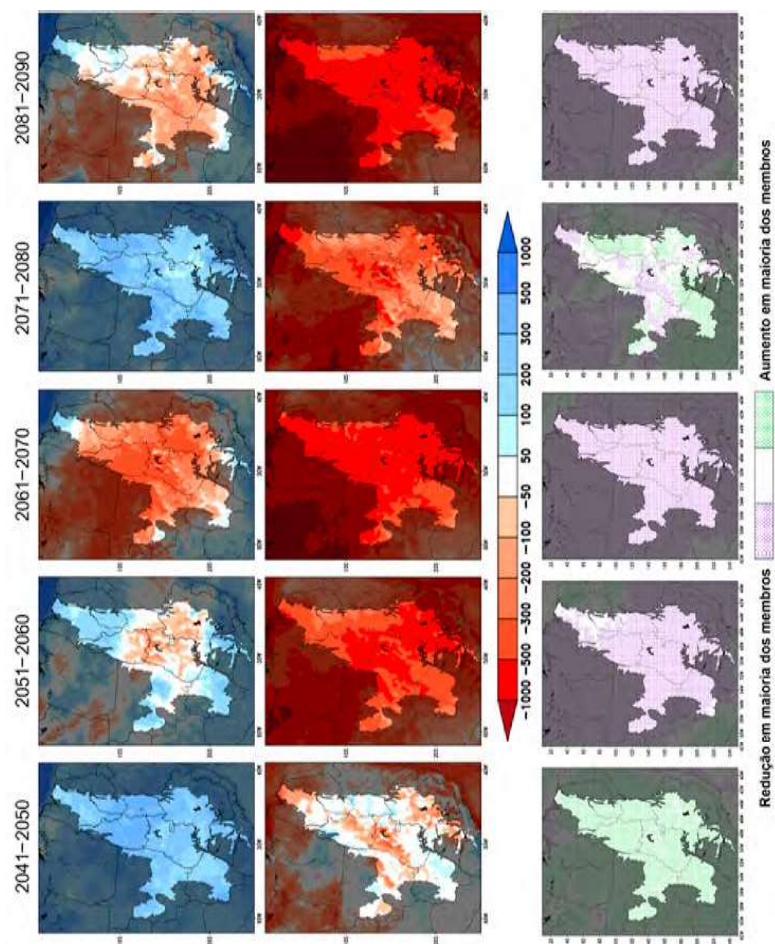


Figura 12.10. Limites superiores (linha superior) e inferiores (linha inferior) das mudanças na chuva total anual (mm/ano) no Cerrado. As mudanças são projeções do Modelo Eta das décadas 2041–2050, 2051–2060, 2061–2070, 2071–2080 e 2081–2090 em relação à climatologia do modelo de 1976–2005. Na linha inferior da figura, o hachurado mostra o sinal de mudança da maioria entre as oito projeções de downscaling pelo Modelo Eta.

12.3.3 Disponibilidade hídrica

As mudanças na precipitação e temperatura no Cerrado têm como resultado alterações na disponibilidade hídrica. A disponibilidade hídrica, sob uma perspectiva climática, pode ser estimada por meio do saldo entre a precipitação (P) e a evapotranspiração total (E), representado por $P-E$.

As projeções de mudanças na disponibilidade hídrica no Cerrado para o futuro em relação ao clima presente foram geradas pelo modelo Eta, abrangendo o período do meio para o final do século (Figura 12.11). A técnica de correção de viés foi aplicada na precipitação e evapotranspiração total. As projeções indicam um padrão consistente dessas mudanças, independentemente do modelo, cenário e período. Observa-se uma redução na disponibilidade hídrica ($P-E$) de até 500 mm ano^{-1} em grande parte do Cerrado, sugerindo um potencial de déficit hídrico significativo nesta região para o futuro. Na parte norte do Cerrado, as projeções mostram mudanças positivas de $P-E$ em torno de 100 mm ano^{-1} .

Oliveira et al. (2019) verificaram, a partir das projeções do Modelo Eta, uma tendência decrescente na vazão na bacia do Alto Paranaíba, localizada no oeste de Minas Gerais. Os maiores decréscimos ocorreram principalmente no período chuvoso, entre outubro e março, com redução média de 44,4 e 52,3% para os dois cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, ao longo do século XXI. Os autores encontraram uma redução de até 75% nos picos da vazão durante o período de 2071 a 2099 para o RCP8.5, o que indica um potencial problema futuro na disponibilidade hídrica nestas bacias do Cerrado.

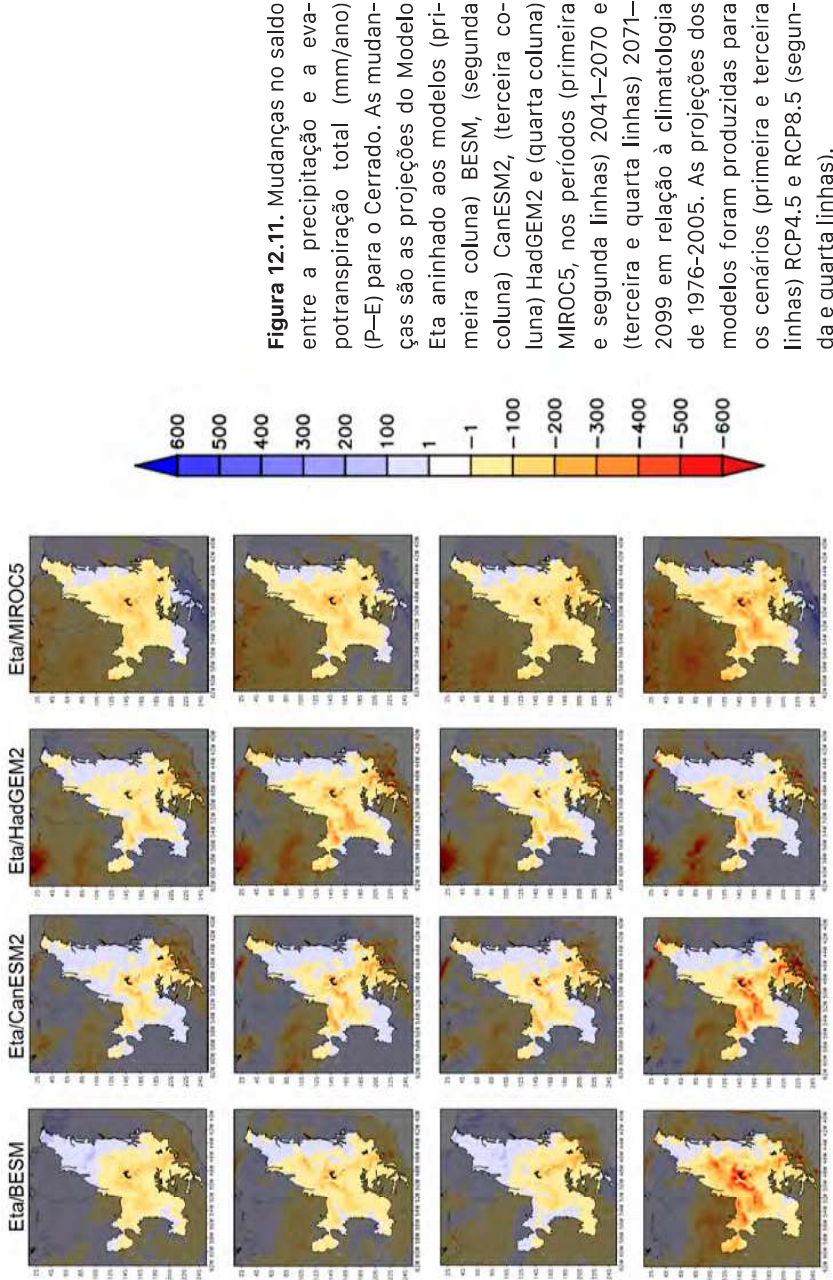


Figura 12.11. Mudanças no saldo entre a precipitação e a evapotranspiração total (mm/ano) (P–E) para o Cerrado. As mudanças são as projeções do Modelo Eta aninhado aos modelos (primeira coluna) BESM, (segunda coluna) CanESM2, (terceira coluna) HadGEM2 e (quarta coluna) MIROC5, nos períodos (primeira e segunda linhas) 2041–2070 e (terceira e quarta linhas) 2071–2099 em relação à climatologia de 1976–2005. As projeções dos modelos foram produzidas para os cenários (primeira e terceira linhas) RCP4.5 e RCP8.5 (segunda e quarta linhas).

No Leste do Cerrado, Ribeiro Neto et al. (2016) analisaram as mudanças na vazão do Rio São Francisco a partir das projeções do Modelo Eta no cenário de alta emissão, RCP8.5. Os autores constataram que as projeções indicam diminuição na vazão entre cerca de 41 a 63% no período de 2041–2070. Em bacias a leste do Rio Tocantins, Rodrigues et al. (2019) estimaram os índices SPI e SSFI (do inglês Standardized StreamFlow Index) a partir das projeções do Modelo Eta e do modelo hidrológico SWAT. Os autores encontraram as tendências de secas hidrológicas aumentando mais intensamente que as secas meteorológicas.

A partir de sete modelos do CMIP6 com correção de viés nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, Siqueira et al. (2021) avaliaram a vazão nas bacias hidrográficas do Cerrado para até 2100. Os autores encontraram uma redução na vazão devido à redução na precipitação e ao aumento na temperatura do ar. Essa redução na vazão foi acentuada quando considerados os experimentos de reflorestamento nas bacias. De acordo com os autores, além dos impactos das mudanças climáticas, as florestas produzem uma alta evapotranspiração e uma grande quantidade de água interceptada pelas copas das árvores. Além disso, o sistema radicular mais profundo das árvores resulta em absorção e demanda adicionais de água, o que, por sua vez, leva a um aumento na transpiração e a menos água disponível para a recarga das águas subterrâneas. Por outro lado, em experimentos numéricos de reflorestamento utilizando modelo hidrológico desacoplado (offline) ao modelo climático, a água da evapotranspiração da floresta não é reciclada na precipitação.

Tavares et al. (2023a) avaliaram as mudanças nos componentes do balanço hídrico sob níveis de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C para as principais bacias hidrográficas brasileiras, utilizando projeções regionalizadas do modelo Eta. Os autores identificaram que, mesmo que o aquecimento global seja limitado a 1,5 °C, um marco crítico apontado pelo IPCC, a disponibilidade hídrica das bacias inseridas no bioma Cerrado pode diminuir em torno de 20%, aliada a um aumento nos períodos de seca, podendo produzir impactos significativos na agricultura, geração de energia hidroelétrica e turismo.

Na Quarta Comunicação Nacional do Brasil (Brasil, 2021), indicadores de escassez e estresse hídrico foram utilizados para dimensionar a disponibilidade hídrica, que é um dos componentes do Índice de Segurança Hídrica no contexto da mudança do clima (ISHmc). Projeções sob níveis de aquecimento médio global de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C indicaram que o Cerrado, juntamente com os biomas Caatinga e Mata Atlântica, serão os mais afetados, com reduções significativas na disponibilidade hídrica em cenários futuros. O ISHmc considera não apenas a disponibilidade, mas também a acessibilidade, a segurança, a qualidade e a governança dos recursos hídricos como componentes essenciais. Os resultados apresentados na Comunicação sugerem que os riscos atuais podem ser agravados. Isso ocorre principalmente devido à expansão agrícola irrigada, à falta de saneamento e controle de qualidade da água, à poluição difusa no meio rural e à perda de biodiversidade.

Por fim, ressalta-se que independentemente do modelo climático ou do cenário de emissão, as projeções têm indicado que o balanço hídrico sobre a região do Cerrado pode ser negativamente afetado pelas mudanças climáticas. De acordo com o conjunto de projeções, o balanço hídrico (P–E), que indica a disponibilidade de água para a hidrologia de superfície, indica decréscimos significativos de até 81,6% até o final de 2099.

12.3.4 Bioma Cerrado

Diante da importância socioeconômica e ambiental do Cerrado, apresentam-se os possíveis impactos das mudanças climáticas no bioma a partir de simulações do Modelo Eta, adotando dois cenários de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) no clima futuro, RCP4.5 e RCP8.5. O modelo climático regional Eta é forçado pelas projeções do modelo climático global HadGEM2-ES. Essas projeções (Chou et al., 2014b) indicam redução das chuvas anuais, períodos de estiagem mais longos e aumento significativo das temperaturas médias, máximas e mínimas no Cerrado (Seção 12.3.2 deste capítulo). As projeções de mu-

danças climáticas no Cerrado produzidas pelo Modelo Eta alimentam o modelo de vegetação dinâmica Inland.

O Inland é baseado no modelo Integrated Biosphere Simulator (IBIS) (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000) e faz parte da nova geração de modelos da biosfera terrestre. O modelo considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais, e representa os processos da superfície terrestre relacionados à energia, água, solo e atmosfera.

As projeções do Eta-Inland, forçadas pelo modelo global HadGEM2-ES no cenário RCP8.5, indicaram grandes mudanças na cobertura vegetal sobre a Amazônia, principalmente a substituição da floresta tropical e cerrado por pastagem (Lyra et al., 2016). No bioma Cerrado, os impactos são ainda mais significativos; por exemplo, no meio do século, na década de 2055–2065, já são projetadas mudanças nos tipos de vegetação que abrangem praticamente toda a área do Cerrado (Figura 12.12). Considerando ambos os cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, em praticamente toda a área, os tipos de vegetação iniciais, como Savana e Floresta Decídua, são substituídos pelo tipo de vegetação Pastagem Natural (Figura 12.12). No final do século, esse mesmo padrão de mudança se mantém. As projeções de Lyra et al. (2016) resultam da mudança na cobertura do solo em resposta às mudanças de temperatura e precipitação devido às mudanças climáticas globais, ou seja, em que os níveis dos gases de efeito estufa se alteram.

Por outro lado, mudanças na temperatura e precipitação ocorrem devido às mudanças no uso do solo. Grande parte da área do bioma Cerrado atualmente é utilizada para agricultura. Essas mudanças nos biomas também acarretam mudanças na distribuição das chuvas, no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica. Loarie et al. (2011) quantificaram os efeitos climáticos diretos da conversão de cerrado para pastagem. Os estudos foram realizados com base em mapas da expansão da cana-de-açúcar e remoção de vegetação natural. Os principais efeitos climáticos devido à conversão da vegetação natural para agricultura ou pastagem foram aumento da tem-

peratura e do albedo da superfície e diminuição da evapotranspiração. Desta forma, da mesma maneira que as alterações no clima causam impactos na cobertura da vegetação, as mudanças no uso do solo também podem afetar os processos que controlam o clima em uma região.

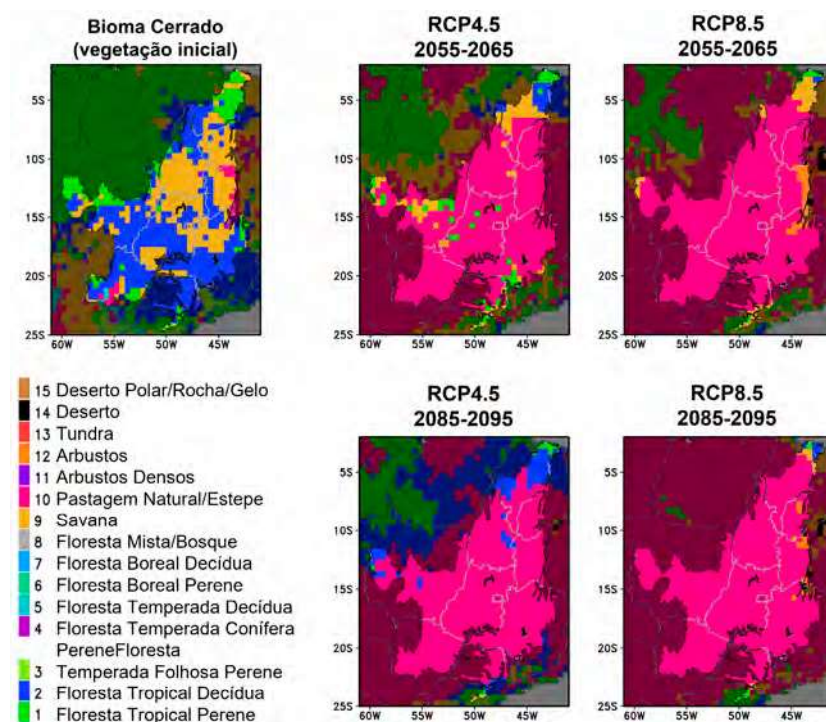


Figura 12.12. Tipos de vegetação inicial (coluna da esquerda) e mudanças na cobertura vegetal a partir das projeções do modelo de vegetação dinâmica Inland, que por sua vez utilizou as projeções do Modelo Eta forçado pelo modelo climático HadGEM2-ES, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, no meio (linha superior) e no final (linha inferior) do século XXI na região do bioma Cerrado. A área em destaque delimita o bioma Cerrado.

Outros estudos, utilizando diferentes modelos climáticos, métodos de modelagem e cenários de emissão de carbono, analisaram os efeitos das mudanças climáticas sobre o Cerrado. Simon et al. (2013)

usaram modelos bioclimáticos para os impactos na distribuição geográfica de espécies de importância econômica e cultural. As espécies estudadas apresentaram fortes reduções na distribuição geográfica no Cerrado, com redução média de $78\% \pm 7\%$ da área até o ano de 2080. Portanto, as mudanças climáticas no Cerrado mostram a possibilidade de perda de área e redução da distribuição geográfica considerando o uso econômico de algumas espécies.

12.4 Considerações finais

É importante destacar que são observadas no clima atual tendências de mudanças na temperatura, umidade relativa do ar e precipitação no Cerrado. As tendências de mudanças projetadas para o clima futuro são consistentes com as tendências observadas nas últimas décadas. Isso indica que o Cerrado está enfrentando mudanças significativas na precipitação e temperatura do ar. A redução na umidade relativa do ar é consequência do aumento da temperatura do ar.

As taxas de redução de precipitação observada em afluentes de rios, como Tocantins e São Francisco, podem se agravar, segundo as projeções climáticas. As incertezas das projeções são altas, principalmente na parte central e sudeste do Cerrado. Por outro lado, bacias do Cerrado atendem a múltiplos usos e já sofrem com conflitos pelo uso da água e também abrigam boa parte da capacidade hidrelétrica instalada do Brasil (Eletrobrás, 2018).

O bioma Cerrado tem sofrido aumento significativo nas taxas de desmatamento, especialmente em áreas de expansão da fronteira agrícola, como o Matopiba. A região Central do Cerrado, que já teve mais de 50% de sua área desmatada, continua também sendo uma das mais afetadas pelo desmatamento (Pires, 2020). Entretanto, a substituição do bioma Cerrado por outra cobertura do solo não é considerada nas projeções climáticas. A inclusão nos modelos climáticos de uma cobertura mais fiel ao uso do solo atual pode aprimorar as estimativas das mudanças na precipitação, temperatura e evapotranspiração, e ajudar a reduzir as incertezas das projeções.

Há concordância entre as projeções numéricas de que o Cerrado sofrerá com secas mais prolongadas e severas, principalmente no Noroeste e divisa com a Amazônia. Os estudos mostraram que a perda do bioma Cerrado, combinada com a perda do bioma Amazônia, contribui para a redução nas chuvas nas estações chuvosa e de transição da estação seca para a chuvosa, principalmente na região de contato entre os dois biomas. A identificação precoce de sinais de secas severas ou períodos de estiagem prolongados nas áreas mais críticas do Cerrado é crucial para um planejamento de ações eficazes de mitigação e adaptação à seca.

12.5 Referências

- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, p. 155-183, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.
- ALMEIDA, J. M. V. de. **Índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas na região Centro-Oeste do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4892>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, p. 1039-1056, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009689.
- BEOBIDE-ARSUAGA, G.; BAYR, T.; REINTGES, A.; LATIF, M. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models. **Climate Dynamics**, v. 56, n. 11-12, p. 3875-3888, 2021. DOI: 10.1007/s00382-021-05673-4.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF, 2021. 621 p.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES,

P. (2012). Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635-653. DOI: 10.1007/s00382-011-1002-8.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, Dec. 2014a. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014b. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043.

CHYLEK, P.; LI, J.; DUBEY, M. K.; WANG, M.; LESINS, G. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: canadian earth system model CanESM2. **Atmospheric Chemistry and Physics Discuss**, v. 11, n. 8, p. 22893-22907, 2011. DOI: 10.5194/acpd-11-22893-2011.

COLLINS, W. J. Development and Evaluation of an Earth-System Model—HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011. DOI: 10.5194/gmd-4-1051-2011.

CORREA, W. de S. C.; SOARES, W. R.; AYLAS, G. Y. R.; REIS JUNIOR, N. C.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, v. 43, e774, 2022. DOI: 10.14295/derb.v43.77.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, p. 1970-1979, 2010. DOI: 10.1002/joc.2048.

ELETOBRÁS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro por Bacias**: Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT). 2018. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 30 abr. 2024.

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, p. 603-628, 1996. DOI: 10.1029/96GB02692.

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1-18, 2020. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; de TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. D. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. de. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060-4073, 2021. DOI: 10.1111/gcb.15712.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1991 – 2020**. Edição Digital. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <http://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 30 abr. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. B.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, b. (ed.). Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

JONG, P.; TANAJURA, C.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 1540-1553, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.256.

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; GOWER, S. T.; LENTERS, J. D.; YOUNGMOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 795-825, 2000. DOI: 10.1029/1999GB001138.

LLOPART, M.; REBOITA, M. S.; PORFÍRIO DA ROCHA, R. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 99-116, 2020. DOI: 10.1007/s00382-019-04990-z.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011. DOI: 10.1038/nclimate1067.

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high-resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201502225.

- MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3, p. 63-79, 2012. DOI: 10.1007/s00703-012-0182-z.
- MOSS, R.; EDMONDS, J.; HIBBARD, K.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, 463, p. 747-756, 2010. DOI: 10.1038/nature08823.
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; DE ALMEIDA, R. A. F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JR., M.; IRBER JR., L.; MARCONDES, G. G. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00580.1.
- OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; BESKO, S.; VIOLA, M. R.; SRINIVASANC, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.021.
- PENEREIRO, J. C.; BADINGER, A.; MACCHERI, N. A.; MESCHIATTI, M. C. Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 97-113, 2018. DOI: 10.1590/0102-7786331012.
- PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, 2010. DOI: 10.1007/s00704-009-0123-z.
- PIRES, M. O. 'Cerrado', old and new agricultural frontiers. **Brazilian Political Science Review**, v. 14, 2020. DOI: 10.1590/1981-3821202000030006.
- REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021. DOI: 10.1002/joc.7119.
- RIAHI, K.; VARREN, D. P. van;; KRIEGLER, E. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- RIBEIRO NETO, A.; DA PAZ, A. R.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal**

of **Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1103-1127, 2016. DOI: 10.4236/jwarp.2016.812087.

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R. de; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A. de; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal Climatology**, v. 40, p. 2511-2526, 2020. DOI: 10.1002/joc.6347.

SALVADOR, M. d. A.; BRITO, J. I. B. de. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253-261, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.

SIMON, L. M., OLIVEIRA, G. D., BARRETO, B. D. S., NABOUT, J. C., RANGEL, T. F. L. V. B.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Effects of global climate changes on geographical distribution patterns of economically important plant species in Cerrado. **Revista Árvore**, v. 37, p. 267-274, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000200008.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; NETO, A. A. M.; RODRIGUES, D. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, 100931, 2021. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100931.

TAVARES, P.; ACOSTA, R.; NOBRE, P.; RESENDE, N. C.; CHOU, S. C.; LYRA, A. A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5° C and 2.0° C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, 40, 2023a. DOI: 10.1007/s10113-023-02042-1.

TAVARES, P. S.; PILOTTO, I. L.; CHOU, S. C.; SOUZA, S. A.; FONSECA, L. M. G. Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta com correção de viés. **Repositório LattesData**, v. 1, 2023b. DOI: 10.57810/lattesdata/WAVGSL.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. M.; SIMÕES, P. A.; ZERI, M. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 2173-2190, 2023. DOI: 10.1007/s11069-022-05759-0.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, p. 1033-1043, 2010a. DOI: 10.1175/2010JHM1224.1.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation

evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696-1718, 2010b. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010. DOI: 10.1175/2010JCLI3679.1.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.