



VINICIUS POSSATO ROSSE

**CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DO ESTADO DE
MINAS GERAIS POR REANÁLISE CLIMÁTICA NO
PERÍODO DE 2009 A 2018**

**LAVRAS – MG
2021**

VINICIUS POSSATO ROSSE

**CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS POR
REANÁLISE CLIMÁTICA NO PERÍODO DE 2009 A 2018**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho
Orientador

Dra. Luciana Figueiredo Prado
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2021**

VINICIUS POSSATO ROSSE

**CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS POR
REANÁLISE CLIMÁTICA NO PERÍODO DE 2009 A 2018**

**HYDROCLIMATIC CHARACTERIZATION OF THE STATE OF MINAS GERAIS
BY CLIMATE REANALYSIS FROM 2009 TO 2018**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA EM 17/11/2021
Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho UFLA
Dra. Luciana Figueiredo Prado USP
Dr. Uidemar Moraes Barral UnB
Dr. Marcelo Ribeiro Viola UFLA

Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho
Orientador

Dra. Luciana Figueiredo Prado
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2021**

À Cristo, pelo dom da vida e graça que me
acompanham. Aos meus pais, José e
Rose, pelo amor, carinho e paciência
com que sempre me trataram. Aos meus
tios, Reginaldo e Denise, que me
adotaram como filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Cristo, meu Senhor e Salvador, pela graça e pela misericórdia que me sustentaram ao longo de minha jornada universitária. Durante os momentos mais atribulados, nos quais o medo, a dúvida e a incerteza me tomaram, foram as suas mãos que me sustentaram e que seguem me sustentando até o dia de hoje.

Agradeço aos meus pais, José e Rose, que, apesar de distantes geograficamente, sempre se fizeram muito presentes. Muito obrigado pelos sacrifícios que fizeram por mim! Muito obrigado pelas horas e mais horas de trabalho em prol de minha educação!

Agradeço aos meus tios, Reginaldo e Denise, e às minhas primas, Ana Luísa e Isabela, com os quais tive a oportunidade de conviver ao longo de toda a graduação. Muito obrigado pelos bons momentos, dos quais jamais me esquecerei.

Agradeço ao professor Marcelo, cujo amor e dedicação à pesquisa me fizeram admirá-lo desde o nosso primeiro projeto de pesquisa juntos. Considero-me privilegiado por tê-lo como o meu orientador. Grande parte de meu desenvolvimento acadêmico é devido às conversas, reuniões e projetos elaborados em conjunto.

Agradeço ao Núcleo de Pesquisas em Poluição Urbana e Agroindustrial (NEPUAI), do qual fiz parte ao longo de pouco mais de um ano, por todas as oportunidades de amizade que enriqueceram a minha graduação e por todas as atividades que me tornaram um melhor estudante.

Agradeço aos meus colegas de graduação, Breno, Jonathan e Bia, cuja companhia me proporcionou bons momentos de descontração e inúmeras boas lembranças das quais jamais irei me esquecer; agradeço, sobretudo, por cada trabalho em grupo, os quais sempre me angariaram boas notas.

Agradeço a todos os professores e colegas que, apesar de não mencionados na presente seção cooperaram direta e indiretamente com a minha trajetória na UFLA.

Agradeço à UFLA e ao CNPq pela estrutura e auxílio dados ao meu desenvolvimento universitário.

Agradeço ao programa de cooperação Brasil-Colômbia (BRACOL), que me possibilitou conhecer de perto diversas pessoas extraordinárias, cujas distintas culturas me tornaram um ser humano mais completo e melhor.

RESUMO

A hidroclimatologia é a área da ciência dedicada ao estudo da interação entre os processos hidrológicos e o clima. A partir dela, é possível de se avaliar os efeitos das variáveis climáticas, tais como a temperatura e a precipitação, na disponibilidade hídrica de uma determinada localidade, além das consequências oriundas dos processos de variabilidade climática. Diante disso, o presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo o de caracterizar o estado de Minas Gerais (MG), no período de 2009 a 2018, segundo determinados aspectos hidroclimáticos, tais como os valores de déficit e de excedente hídricos, obtidos via aplicação de balanços hídricos climatológicos, e índices de extremos climáticos, a partir dos quais pode-se determinar, por exemplo, os graus de ameaça climática de seca e de chuvas intensas. Para a condução do presente estudo, foram utilizados dois conjuntos de dados de reanálise ERA5, obtidos através da plataforma da *Copernicus Climate Change Service (C3S)*, para a realização de balanços hídricos climatológicos segundo a metodologia de Thornthwaite and Mather e para a determinação dos índices de ameaça climática, elaborados pela AdaptaBrasil – MCTI. Os dados obtidos nos permitiram verificar valores elevados de déficit hídrico ao longo de toda a porção norte de MG, com destaque para os anos de 2014 a 2016, nos quais, em algumas localidades, os valores encontrados foram superiores a 500 mm. Tais resultados, em consonância com os obtidos para os índices de extremos climáticos e o índice de precipitação padronizado, demonstram os distintos aspectos climatológicos presentes em MG, bem como os efeitos da crise hídrica pela qual o estado passou ao longo de 2015, por exemplo. A determinação do grau de ameaça climática para a região demonstrou que MG apresenta ameaça classificada como muito baixa ou baixa, tanto para seca quanto para chuvas intensas. Por fim, pode-se ressaltar que a importância de estudos como o esboçado pelo presente trabalho de conclusão de curso reside no fato de que, através da hidroclimatologia, pode-se caracterizar o comportamento de importantes variáveis climatológicas, tais como a precipitação e a temperatura, nas quais, seja pelo efeito das mudanças climáticas ou de sistemas atmosféricos, o impacto pode causar prejuízos ao meio ambiente. Através de tais estudos, portanto, medidas relacionadas à atenuação dos efeitos climáticos na sociedade podem ser analisadas.

Palavras-chave: Hidroclimatologia. Ameaça climática. Ciclo hidrológico. Reanálise.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	8
1. INTRODUÇÃO	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. Ciclo Hidrológico.....	9
2.2. Balanço Hídrico Climatológico.....	10
2.3. Sistemas Precipitantes do sudeste brasileiro	13
2.3.1. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	15
2.3.2. ENOS (<i>El niño</i> Oscilação Sul)	15
2.3.3. Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e Jatos de Baixos Níveis (JBN).....	16
2.3.4. Sistemas frontais	16
2.4. Dados de Assimilação de Modelos	17
2.5. Índices de Precipitação e de Ameaça Climática.....	18
2.5.1. Índices de Extremos Climáticos de Precipitação.....	18
2.5.2. Índice Padronizado de Precipitação (SPI)	19
2.5.3. Índices de Ameaça Climática	21
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
SEGUNDA PARTE	27
CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS.....	27
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAIS E MÉTODOS	28
2.1. Área de estudo.....	28
2.2. Conjunto de dados de reanálise utilizados	29
2.3. Balanço Hídrico Climatológico (BHC).....	29
2.4. Interpolação.....	30
2.5. Índices de Extremos Climáticos e SPI	30
2.6. Normalização dos Índices de Ameaça Climática	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4. CONCLUSÃO	52
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

Segundo a primeira parte do sexto relatório do IPCC – AR6 (Painel Intragovernamental sobre Mudanças Climáticas) publicada no ano de 2021, as mudanças climáticas tendem a culminar no aumento da temperatura média de todas as regiões do planeta, tendo sido elaborados diversos cenários nos quais verifica-se tal aumento já nos curto (2021-2040), médio (2041-2060) e longo (2061 – 2080) prazos em relação ao período de 1850 e 1900 (IPCC, 2021; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

Dentre as consequências dos efeitos das mudanças climáticas estão a intensificação dos extremos climáticos e a aceleração do ciclo hidrológico (GIORGI et al., 2011). Tais efeitos, quando combinados, podem cooperar com a ocorrência de chuvas e de secas mais intensas (C.; DJEBOU; SINGH, 2016), modificando o padrão de precipitação de diversas localidades. Segundo o AR6, por exemplo, espera-se que a Região da Monção da América do Sul apresente os maiores aumentos de temperatura nos dias mais quentes do ano (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021), o que tenderá a impactar diversas outras regiões, dada a influência de tal região no clima das demais (GAN et al., 2016).

Para que tais efeitos possam ser monitorados e mensurados, elaboraram-se diversas metodologias por meio das quais pode-se determinar o grau de armazenamento hídrico do solo, a ocorrência de eventos extremos e o grau de ameaça atrelado à seca e às chuvas intensas, por exemplo.

Para a determinação do armazenamento hídrico pode-se fazer uso do balanço hídrico climatológico (BHC), através do qual obtém-se os valores de déficit (DEF) e de excedente (EXC) hídricos (PASSOS; ZAMBRZYCKI; PEREIRA, 2017; SAMPAIO; COSTA, 2013); para a avaliação dos extremos climáticos, pode-se utilizar índices relacionados às características de temperatura e de precipitação (PETERSON et al., 2001); por fim, para a obtenção do grau de ameaça climática, pode-se fazer uso dos índices de ameaça climática de seca e de chuvas intensas (ADAPTABRASIL, 2020).

No Brasil, dentre as regiões que, recentemente, enfrentaram períodos de escassez hídrica (NOBRE et al., 2016) e que recebem influência da Monção da América do Sul em suas características, pode-se destacar a sudeste, na qual encontram-se importantes regiões hidrográficas, a maior densidade populacional do país e o estado de Minas Gerais (MELO

JÚNIOR et al., 2006), cujos fatores intervenientes em sua condição climática estão atrelados a sistemas atmosféricos complexos e dinâmicos.

Diante do exposto, a importância do presente trabalho reside na necessidade de se avaliar os aspectos hidroclimáticos do estado de MG, tendo como objetivos a utilização de metodologias que permitam a quantificação do nível de armazenamento hídrico no solo e dos graus de ameaça climática de seca e de chuvas intensas através de índices convencionados e consagrados pela literatura científica internacional para o período de 2009 a 2018.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Ciclo Hidrológico

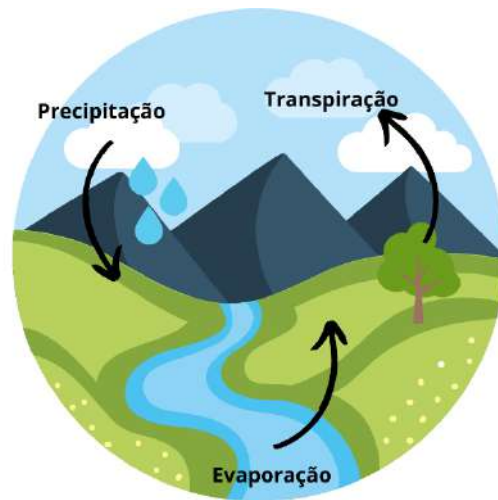
O ciclo hidrológico é um processo essencial ao funcionamento dos sistemas bióticos e abióticos; através dele, pode-se descrever o processo pelo qual a água, presente nas fases líquida, gasosa e sólida, é transferida e retornada à atmosfera e à superfície (oceanos e continentes) (DE MIRANDA; DE OLIVEIRA; DA SILVA, 2010). Tal ciclo, por exemplo, é influenciado pela energia radioativa oriunda do sol e pela ação da gravidade (KOUTSOYIANNIS, 2020).

Tratando-se da superfície, esta é responsável por grande parte deste ciclo, uma vez que por intermédio das rochas, do solo e dos corpos hídricos (lagos, rios e oceanos), grande parte da água é transportada, garantindo a circulação do volume de água em tais ambientes (YANG; YANG; XIA, 2021). Levando-se em consideração tais fluxos de água em circulação devido ao ciclo hidrológico, pode-se verificar que esta transferência pode ser dada em duas possíveis direções: Atmosfera – Superfície (i) e Superfície – Atmosfera (ii).

Quando o processo ocorre da atmosfera para a superfície, a água é circulada, principalmente, através do processo de precipitação, no qual o vapor de água é depositado na forma de chuva, geada, neve ou granizo, por exemplo. Por sua vez, quando o processo se dá da superfície para a atmosfera, o fluxo de água é circulado, majoritariamente, através dos processos de evaporação (transferência da água presente em uma superfície para a atmosfera na forma de vapor) e de transpiração (transferência da água resultante de sistemas fisiológicos de plantas). Tais processos, quando se dão ao mesmo tempo, recebem o nome de evapotranspiração (BALBINOT et al., 2008; BRITTO; BAPTISTA; LIMA, 2019).

Na figura 1 encontram-se descritos os principais mecanismos responsáveis pelo ciclo hidrológico.

Figura 1: Descrição das componentes do ciclo hidrológico.



Fonte: Do autor (2021)

Além dos aspectos supracitados, o ciclo hidrológico ainda corrobora com a recarga de aquíferos, uma vez que a parcela de água precipitada à superfície infiltra-se e atinge as camadas mais internas do solo. Caso a infiltrabilidade básica do solo tenha sido alcançada, o excedente precipitado poderá gerar o escoamento superficial direto, responsável, muitas vezes, pela ocorrência de processos erosivos. Além de tal consequência, o escoamento superficial direto ainda é responsável por transportar a água presente no continente (rios e lagos, por exemplo) para o oceano (VINAYACHANDRAN; JAHFER; NANJUNDIAH, 2015).

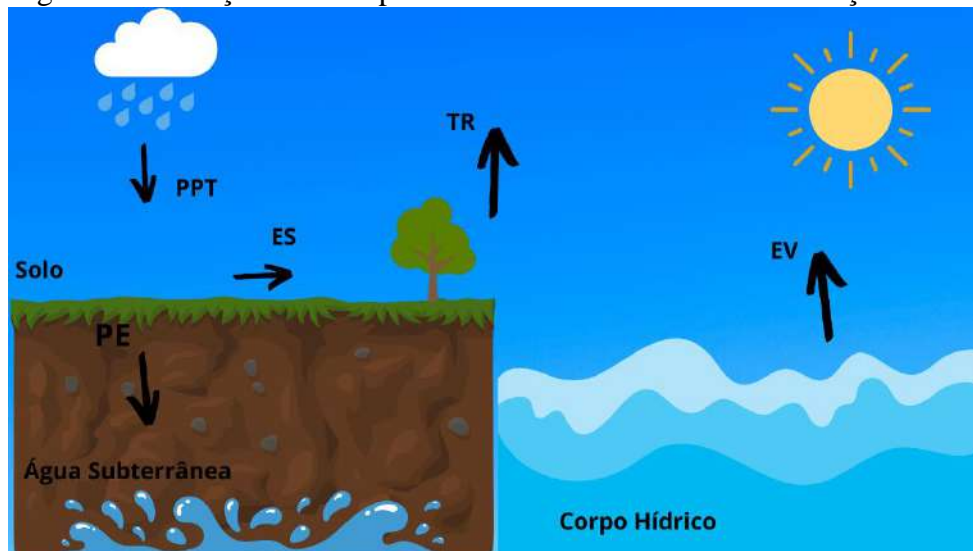
2.2. Balanço Hídrico Climatológico

Dada a importância do ciclo hidrológico para os demais processos e fenômenos naturais, diversos estudos relacionados à sua sistematização e estimativa foram elaborados com o intuito de avaliar a disponibilidade hídrica de uma dada localidade levando-se em consideração as componentes de entrada e de saída presentes no ciclo da água (SAMPAIO; COSTA, 2013). Por tratar-se de um sistema cíclico e fechado, pode-se recorrer à lei da conservação da massa para se explicar os efeitos das componentes presentes no ciclo hidrológico nos fluxos de água circulados. À técnica utilizada para a mensuração da disponibilidade hídrica de uma dada área dá-se o nome de balanço hídrico (ANACHE, 2017).

Uma vez que o ciclo hidrológico é o responsável pela circulação hídrica entre a atmosfera e a superfície, as componentes que o influenciam serão as mesmas levadas em

consideração na realização do balanço hídrico. A figura 2 mostra os componentes de entrada e de saída levados em consideração na realização do balanço hídrico.

Figura 2: Descrição das componentes de entrada e saída do balanço hídrico.



Fonte: Do autor (2021).

Dentre as componentes exibidas na Figura 2 estão a precipitação (PPT), que é considerada a principal responsável pela entrada de água no sistema, a transpiração (TR), a evaporação (EV), a percolação (PE) e o escoamento superficial direto (ES), sendo estas últimas as responsáveis pela saída de água do sistema. A interação entre tais componentes em uma dada localidade é a responsável pela variação do armazenamento hídrico ao longo do tempo, o que pode culminar em excedentes ou déficits hídricos.

Para que tais valores de déficits e de excedentes hídricos possam ser determinados, pode-se utilizar diversos métodos, a partir dos quais o balanço hídrico pode ser realizado. Dentre os métodos existentes, há o de Thornthwaite and Mather, um dos mais consolidados e utilizados em estudos relacionados ao armazenamento hídrico (MAMMOLITI et al., 2021; THORNTHWAITE; MATHER, 1951).

Para a execução de tal método, deve-se dispor das séries mensais de precipitação (mm), da temperatura (°C) e da latitude (°) local. As fórmulas utilizadas para a execução de tal método encontram-se dispostas nas equações de 1 a 10.

$$PE = 16 \times \left(10 \times \frac{T}{I} \right)^a \quad (1)$$

Em que **PE** (mm.mês⁻¹) é a evapotranspiração potencial; **T**, é a temperatura média mensal (°C); as variáveis **I** (índice de calor) e **a**, podem ser determinados conforme as equações 2 e 3, respectivamente.

$$I = \sum_{i=1}^{n=12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 6,756 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,49239 \quad (3)$$

Em seguida, deve-se determinar o valor da variável **Negativo Acumulado (NAc)** a partir dos resultados negativos das subtrações de P – PE para cada mês. Caso este valor seja positivo, se classifica tal mês como sendo úmido; caso não o seja, como seco.

$$NAc = \sum(P - PE), \text{ se } (P - PE) < 0 \quad (4)$$

Em relação ao valor da capacidade de água disponível (CAD), necessário à execução do BHC, este é calculado com base em determinadas propriedades do solo no qual se está realizando o estudo. A equação 5 possui a metodologia que permite a sua determinação.

$$CAD = 0,01 \times (CC - PMP) \times \rho \times Z \quad (5)$$

Na equação 5, a sigla CC refere-se à capacidade do campo (%), que corresponde ao limite máximo de água que o solo é capaz de reter sem que haja infiltração/percolação; a sigla PMP refere-se ao ponto de murcha permanente (%), que corresponde ao valor de umidade a partir do qual a planta torna-se incapaz de retirar a água presente no solo, murchando e não mais recuperando a sua turgidez; ρ corresponde à densidade do solo (kg.m⁻³); por fim, Z refere-se à profundidade do sistema radicular, definida como a profundidade máxima na qual as raízes penetram no solo. De maneira geral, para simplificação dos procedimentos, adota-se o valor de 100 para a capacidade de água disponível (CAD) (GUIMARÃES et al., 2016; SILVA; SILVA; SANTANA, 2017)

Após a determinação do valor de CAD, determina-se o valor da variável ARM (armazenamento hídrico) a partir da Equação 6.

$$ARM = CAD \times e^{\left(\frac{NAC}{CAD}\right)} \quad (6)$$

Com os valores anteriores calculados, pode-se determinar o valor de **ALT** (alteração do armazenamento) segundo a Equação 7.

$$ALT = ARM - ARM_{mês\ anterior} \quad (7)$$

Caso o resultado obtido a partir da Equação 7 seja positivo, houve reposição de água no solo; se negativo, houve saída de água. Em sequência, prossegue-se à determinação do valor da evapotranspiração real (**ETR**) a partir de uma das modalidades da equação 8.

$$\begin{aligned} ETR &= P + |ALT|, \text{ se } (P - PE) < 0 \\ ETR &= PE, \text{ se } (P - PE) \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Por fim, deve-se determinar os valores de **DEF** (déficit hídrico) e de **EXC** (excedente hídrico) a partir das equações 9 e 10, respectivamente.

$$DEF = PE - ETR \quad (9)$$

$$\begin{aligned} EXC &= 0, \text{ se } ARM < CAD \\ EXC &= (P - PE) - ALT, \text{ se } ARM = CAD \end{aligned} \quad (10)$$

Através das equações e procedimentos supracitados torna-se possível a realização do balanço hídrico climatológico e a consequente obtenção dos valores de déficit e excedente hídricos na unidade de mm.mês^{-1} .

2.3. Sistemas Precipitantes do sudeste brasileiro

A região sudeste do Brasil é caracterizada diversas variáveis intervenientes no processo de circulação entre a atmosfera e o oceano, o que confere à essa região uma grande complexidade no que se refere à análise da ocorrência de fenômenos climatológicos e hidrológicos, por serem estes influenciados por diversos sistemas.

Dentre tais sistemas, pode-se citar o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), que se trata de um fenômeno atmosférico de grande escala que interfere na direção dos ventos

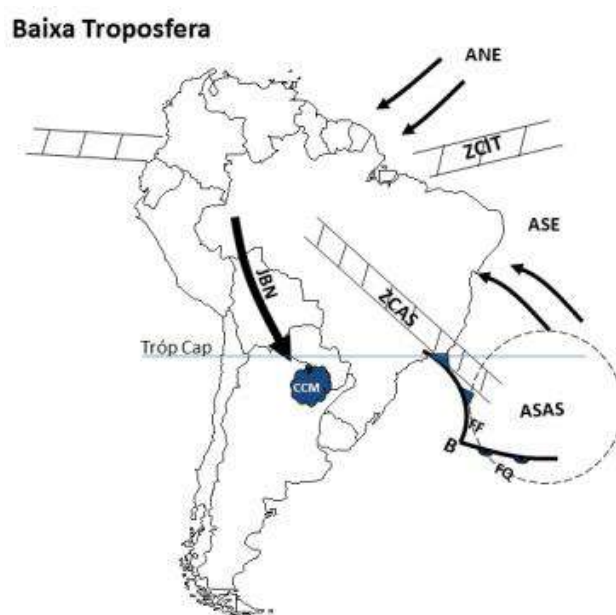
e no regime de chuvas durante o período de transição entre o verão e o inverno (GAN et al., 2016). Devido a tal interferência, as regiões nas quais tal fenômeno atua tendem a apresentar duas estações bem definidas, com invernos secos e verões mais úmidos (SILVA; ESCOBAR; REBOITA, 2020). Durante muito tempo, não levava-se em consideração a ocorrência da SMAS; porém, após estudos realizados na década de 90 verificaram a existência do regime de monção.

Entretanto, apesar de a SMAS garantir estações úmidas e secas bem definidas, diversos fatores asseguram a ocorrência de tais características. Dentre estes, estão aqueles relacionados aos sistemas precipitantes, tais como a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), as teleconexões (El niño/La niña), o anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), os Jatos de Baixo Nível (JBN) e os sistemas frontais, por exemplo (DE MELLO; VIOLA, 2013; REBOITA et al., 2015a).

Por fim, além dos fatores mencionados anteriormente, ainda deve-se ressaltar que, segundo estudos, as mudanças climáticas também têm corroborado com a intensificação da ocorrência de extremos climáticos e com a aceleração do ciclo hidrológico (C.; DJEBOU; SINGH, 2016).

Na figura 3 encontram-se os principais sistemas atmosféricos em atuação na América do Sul.

Figura 3: Sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul.



Fonte: REBOITA et al., 2015b

Na Figura 3, os significados das siglas são os seguintes: ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul; JBN – Jatos de Baixo Nível; ZCIT – Zona de Convergência Intertropical; ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul; B – Baixa Pressão; ANE – Ventos Alísios de Nordeste; ASE – Ventos Alísios de Sudeste; CCM – Complexos Convectivos de Mesoescala; FF – Frente Fria; FQ – Frente Quente.

2.3.1. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS trata-se de um dos principais sistemas precipitantes atuantes no território brasileiro. Tal zona corresponde a uma faixa de nebulosidade que perpassa toda a região amazônica estendendo-se até o Oceano Atlântico (REBOITA et al., 2015a). Forma-se a partir da atuação de regimes frontais estacionários de precipitação (FPA – Frente Polar Atlântica) presentes em grande parte do sudeste brasileiro (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIA, 2001; SELUCHI, M; BEU; ANDRADE, 2016).

A ZCAS influencia de maneira considerável o regime de precipitação de diversas localidades do Brasil, sendo considerada determinante para a formação de chuvas durante a estação chuvosa da região sudeste (REBOITA et al., 2010). Cabe ressaltar que a ocorrência da ZCAS não é afetada apenas pela atuação da FPA, mas também pelas oscilações causadas pelo ENOS (El niño Oscilação Sul) e pela confluência de ventos de nordeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (SILVA; ESCOBAR; REBOITA, 2020).

2.3.2. ENOS (*El niño* Oscilação Sul)

O fenômeno natural conhecido como ENOS se dá nas componentes oceânica e atmosférica. Esta, refere-se à variação dos valores de pressão ao nível do mar em uma dada região; aquela, refere-se à variação de temperatura do mar (DOS SANTOS; SATYAMURTY; DOS SANTOS, 2012; TRENBERTH, 2019). Tais variações podem ocasionar grandes alterações no regime de circulação atmosférica e oceânica. Além disso, deve-se ressaltar que, tratando-se da componente oceânica, esta pode apresentar duas fases, que variarão de acordo com o sinal da anomalia de temperatura: se positiva, dá-se o nome de *El niño*; se negativa, dá-se o nome de *La niña* (ARAÚJO et al., 2013).

Em relação às pesquisas já realizadas para a verificação dos efeitos do ENOS nos níveis de precipitação do estado de Minas Gerais ou mesmo na América do Sul, estas apresentaram tanto resultados que demonstram a relação entre o ENOS e variações na precipitação (GRIMM, 2011; LARKIN; HARRISON, 2005) quanto resultados nos quais tal relação é desconsiderada

(COELHO; DRUMOND; AMBRIZZI, 1999; MINUZZI et al., 2007). Tais pesquisas, deve-se ressaltar, foram conduzidas em anos distintos.

Apesar de muitos trabalhos não terem verificado correlação positiva entre a ocorrência do ENOS e o regime de precipitação na região sudeste, deve-se ressaltar que, segundo estudos, a formação das ZCAS é afetada negativamente pela presença do ENOS, o que, de maneira indireta, faz com que este fenômeno interfira no regime precipitante, uma vez que a ZCAS é essencial para a formação de chuvas (BARROS; DOYLE; CAMILLONI, 2008; GRIMM, 2011; WANDERLEY et al., 2018).

2.3.3. Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e Jatos de Baixos Níveis (JBN)

O anticiclone, ou Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), refere-se a um sistema atuante na região sudeste do Brasil que é responsável por, durante o inverno, contribuir com condições mais secas e ventos mais intensos e, durante o verão, com condições mais úmidas e ventos menos intensos (CARPENEDO; AMBRIZZI, 2020; REBOITA et al., 2010).

O Jato de Baixos Níveis (JBN) refere-se a escoamentos intensos na baixa troposfera que partem da região dos Andes transportando umidade e calor para a região sudeste da América do Sul (DOS SANTOS; DE CAMPOS; CARLA LIMA, 2008; FELIPE, 2015).

Dada a influência de tais sistemas atmosféricos na América do Sul, pode-se ressaltar que ambos podem corroborar com a formação das ZCAS (OLIVEIRA; REBOITA; ROCHA, 2018). O transporte de umidade por meio dos JBN e o posicionamento do ASAS a leste do continente garantem condições propícias à ocorrência de chuvas na região sudeste.

2.3.4. Sistemas frontais

Os sistemas frontais são compostos por uma frente fria e por uma frente quente que separam massas de ar de características diferentes. Massas de ar podem ser definidas como porções de ar com características semelhantes (MARTINS et al., 2009). Tratando-se das frentes frias, estas caracterizam-se pelo deslocamento e pela ascensão do ar quente devido à atuação do ar frio, o que cria condições propícias à ocorrência de chuvas adiante da fria. De maneira geral, antes de sua chegada, é comum a redução da pressão, intensificação dos ventos e elevação da temperatura (SELUCHI, M; BEU; ANDRADE, 2016).

As frentes frias separam a massa de ar quente que avança sobre a massa de ar frio, ocasionando precipitações que variam de intensidade conforme o nível de estabilidade atmosférica (ANDRADE, 2005; MARTINS et al., 2009).

Tais sistemas, quando em atuação, podem corroborar com a ocorrência de chuvas em diversas localidades. Além disso, deve-se ressaltar que a ocorrência de frentes frias é mais frequente do que a ocorrência de frentes quentes, uma vez que a largura longitudinal da América do Sul torna a ocorrência desse fenômeno mais rara e difícil de ser observada (RIBEIRO, 2014).

2.4. Dados de Assimilação de Modelos

Para que estudos relacionados à climatologia e à hidrologia sejam realizados, faz-se necessária a utilização de dados observacionais de boa qualidade e resolução; entretanto, apesar de tal necessidade, é fato que tais dados não costumam encontrar-se disponíveis para a utilização de maneira completa em todos os períodos analisados e em todas as localidades desejadas (STÜKER et al., 2016). Para contornar tais problemas, foram desenvolvidos conjuntos de dados originados a partir da combinação de dados observacionais com modelos de previsão robustos que recebem o nome de reanálises (MICALICHEN; DIAS, 2018; ROSOLEM, 2005).

Tais reanálises são elaboradas com o auxílio de dados medidos e obtidos remotamente (tal como os dados de satélite, por exemplo) que, ao serem aplicados em modelos numéricos de previsão, são forçados ao máximo a apresentarem o mesmo estado verificado na atmosfera (TAREK; BRISSETTE; ARSENAULT, 2020). Através da utilização de tais conjuntos, portanto, pode-se compensar a ausência de dados obtidos via observação, o que facilita a realização de pesquisas em áreas nas quais a presença de estações meteorológicas é pequena ou inexistente.

Dentre os produtos de reanálises mais utilizados atualmente, pode-se destacar os conjuntos ERA5 (5^o geração da reanálise ECMWF), que correspondem à quinta geração do ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo) e são determinados através do método 4D-Var, que se trata de uma técnica de assimilação de dados na qual os dados obtidos observacionais e via estimativas (modelos) são interpolados em relação ao tempo e ao espaço (ANDERSSON; THÉPAUT, 2016; TAREK; BRISSETTE; ARSENAULT, 2020).

Além de mais moderna, a reanálise ERA5 ainda apresenta uma melhor resolução espacial (30 km), condições de se trabalhar com dados horários, uma maior quantidade de dados

satelitais assimilados e a vantagem de não apresentar lacunas em suas séries de dados (ANDERSSON; THÉPAUT, 2016; HOFFMANN et al., 2019).

2.5. Índices de Precipitação e de Ameaça Climática

Devido à necessidade crescente por um monitoramento de maior qualidade relacionado às variáveis meteorológicas, diversos índices de extremos climáticos foram criados e desenvolvidos para facilitar a realização de pesquisas e a mensuração dos fatores climáticos, garantindo com isso, uma maior uniformidade ao processo de análise. Dentre tais índices, pode-se citar os índices de precipitação (ANTONIO; RAQUEL, 2017; NATIVIDADE; GARCIA; TORRES, 2017) e os índices de ameaça, criados a partir da combinação com os primeiros.

2.5.1. Índices de Extremos Climáticos de Precipitação

Devido à preocupação crescente atrelada às questões relacionadas às atuais mudanças climáticas, cada vez mais os índices de extremo climáticos estão sendo utilizados, uma vez que, segundo pesquisas e projeções climáticas, espera-se que os eventos extremos sejam cada vez mais intensificados, o que poderá impactar os diversos sistemas e processos naturais que estão relacionados ao clima (RAYMOND et al., 2020)

Em relação aos índices de extremos climáticos de precipitação, estes estão relacionados principalmente às variáveis de temperatura e de precipitação, sendo utilizados em projetos relacionados à construção de cenários climáticos e no processo de modelagem do clima, fazendo uso de dados modelados e observados para serem determinados e estimados (NATIVIDADE; GARCIA; TORRES, 2017).

Os principais índices de extremos climáticos de precipitação encontram-se disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos índices de extremos calculados (PETERSON et al., 2001)

Nome	Descrição	Unidade
CDD	Número máximo de dias consecutivos com precipitação abaixo de 1mm.	Dias.
CWD	Número máximo de dias consecutivos com precipitação igual ou acima de 1mm.	Dias.
Rx1Day	Precipitação máxima de 1 dia.	mm.
Rx5Day	Precipitação máxima de 5 dias.	mm.
R95p	Precipitação total superior ao percentil 95.	mm.
PRCPTOT	Precipitação total anual.	mm.

Fonte: Mckee et al. (1993).

2.5.2. Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

Dentre os índices de precipitação atrelados ao monitoramento das condições de seca e de chuvas intensas encontra-se o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993), por meio do qual pode-se caracterizar o regime pluviométrico de determinada localidade (GUIMARÃES et al., 2016) em diferentes escalas temporais que variam de acordo com o processo levado em consideração.

Em relação às escalas temporais, estas correspondem à quantidade de meses passados que terão seus volumes de precipitação acumulada levadas em consideração no cálculo de determinação do SPI. Portanto, através de distintas escalas temporais, pode-se traçar o histórico de evolução das condições de seca ou de chuvas intensas de uma determinada localidade (KARAVITIS et al., 2011; SAINI; SINGH; BHARDWAJ, 2020).

A metodologia de cálculo deste índice encontra-se descrita nas equações 11 – 18.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \tau^\alpha} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{\frac{-x}{\beta}} \quad (11)$$

Em que $g(x)$ representa a função de distribuição gama; β e α ($\alpha > 0$) são parâmetros estimados pelo critério da Máxima Verossimilhança (SHAH; BHARADIYA; MANEKAR, 2015; SOUSA et al., 2016) através das equações 12 e 13, respectivamente.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (12)$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha} \quad (13)$$

Em que a variável “A” é determinada através da equação 14.

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (14)$$

Em que “n” é a quantidade de dados referentes às precipitações. Após tais etapas de cálculo, prossegue-se à determinação da função de probabilidade acumulada (Equação 15).

$$G(X) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \tau^\alpha} \cdot \int_0^x x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (15)$$

Uma vez que as séries de precipitação podem conter valores iguais a zero, a função de probabilidade acumulada é modificada e formulada segundo a equação 16.

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad (16)$$

Em que “q” refere-se à probabilidade da precipitação ser igual a zero. Em seguida, é necessária a modificação da equação 16, para que esta seja disposta em termos do valor de Z, com média igual a zero e variância igual a 1 (SHAH; BHARADIYA; MANEKAR, 2015). Tal fórmula encontra-se disposta na equação 17.

$$Z = SPI = - \left(a - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (17)$$

$$Z = SPI = + \left(a - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1$$

Em que as variáveis c_0, c_1, c_2, d_1, d_2 e d_3 equivalem a, respectivamente: 2,525, 0,803, 0,010, 1,433, 0,189 e 0,001. A variável t apresenta distintas formulações a depender do intervalo de $H(x)$ e encontra-se descrita na equação 18.

$$t = \sqrt{\left(\ln \frac{1}{(H(x))^2} \right)} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \tag{18}$$

$$t = \sqrt{\left(\ln \frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1$$

Os valores de SPI (Z) obtidos podem ser interpretados de acordo com os valores presentes na Tabela 2, oferecendo base à classificação de determinadas localidades em úmidas e secas.

Tabela 2: Descrição dos limites do índice de precipitação padronizado.

Limites	Descrição
> 2	Extremamente Úmido
1,5 a 1,99	Muito Úmido
1 a 1,49	Moderadamente Úmido
-0,99 a 0,99	Faixa Normal
-1 a -1,49	Seca Moderada
-1,5 a -1,99	Seca Severa
< -2	Extremamente Seco

Fonte: Mckee et al. (1993).

2.5.3. Índices de Ameaça Climática

Levando-se em consideração a necessidade cada vez maior de mensuração dos impactos causados pelas mudanças climáticas nos diversos setores da sociedade, o sistema de informações e análises sobre impactos das mudanças climáticas – AdaptaBrasil MCTI - (ADAPTABRASIL, 2020) desenvolveu uma metodologia capaz de mensurar o grau de ameaça

climática de determinada localidade a partir do cálculo dos índices de ameaça climática de seca e de chuvas intensas.

Os índices elaborados pela AdaptaBrasil podem ser calculados a partir das equações 19 e 20.

$$IAC_{seca} = \frac{[(0,998 * (1 - SPI) + (0,463 * CDD) + (0,998 * (1 - PRCPTOT))]}{3} \quad (19)$$

$$IAC_{chuva} = \frac{[(1,75 * Rx1Day) + (0,5 * Rx5Day) + (0,5 * R95p) + (0,25 * CWD)]}{4} \quad (20)$$

Tais índices, tendo sido calculados, podem fornecer subsídio à tomada de decisões relacionadas não apenas à gestão pública, mas também à preservação dos recursos naturais presentes em uma dada localidade.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAPTABRASIL. **Sobre o AdaptaBrasil**. Disponível em:

<<https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre/metodologia>>. Acesso em: 3 ago. 2021.

ANACHE, J. A. A. **Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado, (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2017.

ANDERSSON, E.; THÉPAUT, J.-N. ECMWF's 4D-Var data assimilation system - the genesis and ten years in operations. **ECMWF**, v. 115, n. 115, p. 8–12, 2016.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

ANTONIO, C.; RAQUEL, A. Avaliação dos eventos extremos de precipitação no estado do Piauí. v. 1, n. 2004, p. 47–57, 2017.

ARAÚJO, R. G. et al. A influência do evento El niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, p. 469–480, 2013.

BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas The forest role in the hydrological cycle at hydrological basins. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BARROS, V. R.; DOYLE, M. E.; CAMILLONI, I. A. Precipitation trends in southeastern

- South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 1–2, p. 19–33, 2008.
- BRITTO, M.; BAPTISTA, G. M. DE M.; LIMA, E. A. DE. O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 23, p. 127–146, 2019.
- C., D.; DJEBOU, S.; SINGH, V. P. Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. **Environment and Social Psychology**, v. 1, n. 1, 2016.
- CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. South atlantic subtropical anticyclone associated with the southern annular mode and climate impacts in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 605–613, 2020.
- COELHO, C. A. DOS S.; DRUMOND, A. R. DE M.; AMBRIZZI, T. Estudo climatológico sazonal da precipitação sobre o brasil em episódios extremos da oscilação sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n. 1, p. 49–65, 1999.
- DE MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 1, p. 37–44, 2013.
- DE MIRANDA, R. A. C.; DE OLIVEIRA, M. V. S.; DA SILVA, D. F. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109–119, 2010.
- DOS SANTOS, C. A. C.; SATYAMURTY, P.; DOS SANTOS, E. M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 3, p. 329–336, 2012.
- DOS SANTOS, J. G. M.; DE CAMPOS, C. R. J.; CARLA LIMA, E. K. Análise de jatos de baixos níveis associados a um sistema convectivo de mesoescala na américa do sul: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 451–468, 2008.
- FELIPE, D. Jatos de Baixos Níveis a leste dos Andes: Comparação entre duas reanálises. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 423–445, 2015.
- GAN, M. A. et al. Monção na América do Sul. **Revista Climanálise**, v. 04, n. 1686, p. 01–06, 2016.
- GIORGI, F. et al. Higher hydroclimatic intensity with global warming. **Journal of Climate**, v. 24, n. 20, p. 5309–5324, 2011.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011.
- GUIMARÃES, M. J. M. et al. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 3, p. 252–258, 2016.
- HOFFMANN, L. et al. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 5, p. 3097–3214, 2019.
- IPCC. Assessment Report 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. v. 6, p. 42, 2021.

KARAVITIS, C. A. et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. **Water (Switzerland)**, v. 3, n. 3, p. 787–805, 2011.

KOUTSOYIANNIS, D. Revisiting the global hydrological cycle: Is it intensifying? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 8, p. 3899–3932, 2020.

LARKIN, N. K.; HARRISON, D. E. Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, p. 1–4, 2005.

MAMMOLITI, E. et al. Waterbalance, a webapp for thornthwaite–mather water balance computation: Comparison of applicMammoliti, E., Fronzi, D., Mancini, A., Valigi, D., & Tazioli, A. (2021). Waterbalance, a webapp for thornthwaite–mather water balance computation: Comparison of. **Hydrology**, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2021.

MARTINS, J. T. et al. Identificação de sistemas frontais em 3 dimensões. **Caderno de Publicações Acadêmicas**, v. 1, n. 1, p. 141–145, 2009.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, J. N.; KLEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. 8^o Conference on Applied Climatology. **Anais...Anaheim**: Colorado State University, 1993Disponível em: <https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf>

MELO JÚNIOR, J. C. F. DE et al. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 417–425, 2006.

MICALICHEN, M. L. M. DE M.; DIAS, N. L. DA C. Análise comparativa da velocidade do vento e da temperatura do ar, entre dados gerados por reanálises meteorológicas e dados observacionais na região de Minas Gerais. **Ciência e Natura**, v. 40, p. 20, 2018.

MINUZZI, R. B. et al. Influência da La Niña na estação chuvosa da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 345–353, 2007.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600–614, 2017.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. IPCC AR6, WG1: Resumo Comentado. **Observatório do Clima**, v. 2, p. 10, 2021.

OLIVEIRA, D. M. DE; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. DA; A influência da topografia da região sul de Minas Gerais nas variáveis atmosféricas simuladas com o RegCM4. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 758–772, 2018.

OLIVEIRA, L. L. DE; VIANELLO, R. L.; FERREIA, N. J. **Meteorologia Fundamental**. 1^o ed. Viçosa: Editora UFV, 2001.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço Hídrico Climatológico E Classificação Climática Para O Município De Balsas-Ma. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 83, 2017.

PETERSON, T. C. et al. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs Methods with emphasis on analyses of extreme events. **WMO**, n. 48, p. 144, 2001.

RAYMOND, C. et al. Understanding and managing connected extreme events. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 7, p. 611–621, 2020.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206–226, 2015a.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didatica**, v. 8, n. 1, p. 34, 2015b.

RIBEIRO, B. Z. **Climatologia Sinótica Das Frentes Quentes No Sudeste Da América Do Sul**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014.

ROSOLEM, R. **O impacto do desmatamento no ciclo hidrológico: um estudo de caso para a rodovia Cuiabá-Santarém**. [s.l: s.n.].

SAINI, D.; SINGH, O.; BHARDWAJ, P. Standardized precipitation index based dry and wet conditions over a dryland ecosystem of northwestern India. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v. 00, n. 00, p. 1–13, 2020.

SAMPAIO, E. V. D. S. B.; COSTA, T. L. DA. Análise climatológica, classificação climática e variabilidade do balanço hídrico climatológico na bacia do rio Uruçui Preto, PI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 652–664, 2013.

SELUCHI, M. E.; BEU, C. M. L.; ANDRADE, K. M. Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 12, p. 361–376, 2016.

SHAH, R.; BHARADIYA, N.; MANEKAR, V. Drought Index Computation Using Standardized Precipitation Index (SPI) Method For Surat District, Gujarat. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. Icwrcoc, p. 1243–1249, 2015.

SILVA, G. DAS N.; SILVA, J. G. F. DA.; SANTANA, W. M. DE. Estimativa do balanço hídrico climatológico: Um estudo de caso. **Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 13, n. 25, p. 117–127, 2017.

SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1013, 2020.

SOUSA, F. DE A. S. DE et al. The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). **Ambiência**, v. 12, n. 2, p. 707–719, 2016.

STÜKER, E. et al. Comparação Entre Os Dados De Vento Das Reanálises Meteorológicas Era-Interim E Cfsr Com Os Dados Das Estações Automáticas Do Inmet No Rio Grande Do Sul. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 284, 2016.

TAREK, M.; BRISSETTE, F. P.; ARSENAULT, R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a

potential reference dataset for hydrological modelling over North America. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 5, p. 2527–2544, 2020.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The role of evapotranspiration in climate. **Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B**, v. 3, n. 1, p. 16–39, 1951.

TRENBERTH, K. E. El Niño southern oscillation (ENSO). **Encyclopedia of Ocean Sciences**, v. 6, n. November 2012, p. 420–432, 2019.

VINAYACHANDRAN, P. N.; JAHFER, S.; NANJUNDIAH, R. S. Impact of river runoff into the ocean on Indian summer monsoon. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 5, 2015.

WANDERLEY, L. S. DE A. et al. Análise espaço-temporal das chuvas persistentes na região do parque estadual do Rio Doce-Perd, sob influências das ZCAS e ZCOU (OUT/2015 a DEZ/2016). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149–164, 2018.

YANG, D.; YANG, Y.; XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. **Geography and Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 115–122, 2021.

SEGUNDA PARTE

O presente artigo encontra-se formatado segundo os padrões do *Climatic Change Journal*, para o qual será submetido à publicação posteriormente.

CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS POR REANÁLISE CLIMÁTICA NO PERÍODO DE 2009 A 2018

Vinicius Possato Rosse (0000-0002-1211-7746)¹, Luciana Figueiredo Prado (0000-0002-6446-8986)², Marcelo Vieira da Silva Filho (0000-0003-4290-7180)¹

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Lavras, 37200-000, Lavras - MG, Brasil.

² Instituto Oceanógrafo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Autor de correspondência: Marcelo Vieira da Silva Filho (marcelo.filho@ufla.br)

RESUMO

Para a realização do estudo foram utilizadas as variáveis de precipitação (mm) e de temperatura (°C) oriundas de conjuntos de reanálise ERA5 para a realização de balanços hídricos climatológicos (BHC) segundo a metodologia de Thornthwaite and Mather ao longo do período de 2009 a 2018. Além da aplicação do BHC, também foram determinados os valores dos índices de ameaça climática de seca e de chuvas intensas segundo a metodologia da AdaptaBrasil – MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). Foram determinados os índices SPI (índice de precipitação padronizada), CDD, CWD, Rx1Day, Rx5Day, PRCPTOT e R95p. A partir dos resultados obtidos, foram observados valores de déficit hídrico (DEF) mais elevados na porção norte do estado e, principalmente, nos anos de 2014 a 2016 (~ 500 mm), nos quais o estado de MG passou por uma crise hídrica. Os índices CDD apresentaram os maiores valores também na porção norte do estado, indicando ser esta a localidade com a maior quantidade de dias consecutivos secos (~ 50 a 150 dias). Os valores de SPI indicaram características úmidas nos de 2009 e 2013 e secas nos anos de 2014 e 2015, corroborando com os valores de DEF obtidos para o mesmo período. Por fim, tratando-se dos índices de ameaça climática determinados, estes, proporcionalmente aos demais, apresentaram graus de risco baixos e/ou muito baixos tanto para a seca quanto para chuvas intensas.

Palavras-chave: Balanço hídrico. Extremos climáticos. Reanálise ERA5. Ameaça climática.

1. INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico ou “ciclo da água”, é essencial para a manutenção de todos os sistemas naturais e humanos, garantindo estabilidade e equilíbrio a todas as formas de vida (Ball 2000; Bengtsson 2010). Através de tal ciclo, a água, presente tanto no estado líquido, sólido e/ou gasoso, interage com os oceanos, os continentes e a atmosfera por meio de diversos processos, dentro os quais se destaca o da precipitação e o da evaporação, ambos extremamente importantes para a manutenção dos reservatórios subterrâneos e pela distribuição de chuvas de uma determinada localidade (Britto et al. 2019; Wang and Chen 2021; Yang et al. 2021).

Conforme verificado pelas projeções elaboradas pelo IPCC (Gao et al. 2017; Masson-Delmotte et al. 2018), a temperatura média do planeta apresenta tendência positiva, o que poderá afetar diretamente o ciclo

hidrológico, dada a influência da temperatura em sua ocorrência. Dentre as possíveis consequências de tal processo estão a aceleração dos processos hidrológicos e a intensificação dos eventos extremos (Giorgi et al. 2011; Madakumbura et al. 2019).

Além dos impactos relacionados às mudanças climáticas, ainda pode-se citar aqueles causados pelas teleconexões, responsáveis por grandes oscilações climáticas em determinadas localidades (Limberger 1980; Minuzzi et al. 2007). Tais fenômenos ocorrem de maneira natural e podem culminar em interações anômalas entre a atmosfera e o oceano (Yoon et al. 2015; Ndehedehe et al. 2017). Dentre as regiões do território brasileiro afetadas por tais teleconexões encontra-se a região Sudeste, na qual localiza-se o Estado de Minas Gerais, cujas configurações climatológicas, explicadas a partir da presença de importantes sistemas atmosféricos, fazem com que essa região apresente fenômenos de precipitação influenciados pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e por regimes frontais e convectivos (de Mello and Viola 2013; Reboita et al. 2015; Santos 2016), por exemplo.

Para a análise do ciclo hidrológico de uma determinada região, pode-se fazer uso do método de Thornthwaite and Mather, a partir do qual os valores de déficit e de excedente hídricos podem ser verificados tendo como variáveis de entrada as séries de precipitação (mm) e de temperatura (°C) (Thornthwaite and Mather 1957; Passos et al. 2017). Além dos métodos de estudo relacionados ao balanço hídrico, ainda existem diversos índices climáticos que podem ser utilizados na mensuração dos impactos das mudanças climáticas, tais como os índices de ameaça climática propostos pela AdaptaBrasil MCTI (AdaptaBrasil 2020).

Devido à quantidade de estações meteorológicas presentes no estado de Minas Gerais (MG) ser pequena, a utilização de conjuntos de dados de reanálise ERA5 na condução dos estudos torna-se uma opção viável para o aumento da resolução espacial e diminuição de problemas relacionados à ausência de dados (Stüker et al. 2016; Micalichen and Dias 2018), facilitando a realização de análises que não seriam possíveis devido à ausência de dados.

Dado o exposto, o objetivo do presente estudo foi o de determinar os valores de déficit e excedente hídricos de Minas Gerais no período de 2009 – 2018 e os índices meteorológicos e de ameaça climática da região a partir da utilização de dados de reanálise ERA5.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O presente estudo concentrou-se no estado de Minas Gerais, localizado na região sudeste do Brasil, considerado o segundo estado brasileiro mais populoso, contando com, aproximadamente, 21,3 milhões de habitantes e uma extensão territorial de 586.513 km² (IBGE 2020). Tratando-se de características biogeográficas, no estado de Minas Gerais coexistem três diferentes biomas, o Cerrado, a Mata Atlântica e a Caatinga (de Sousa et al. 2010); além disso, o estado apresenta uma grande diversidade topográfica, com valores de altitude máxima próximos aos 3 km (Reboita et al. 2015), e não faz fronteira com o oceano, o que corrobora com a presença de sistemas climáticos dinâmicos no estado (Silva et al. 2020).

Por reunir em uma localidade diferentes biomas, com distintas altitudes e características climatológicas, variáveis tais como a temperatura e a precipitação podem vir a apresentar grandes diferenças em determinadas

regiões do estado (Reboita et al. 2014; Silva et al. 2020). Estudos realizados em MG levando-se em consideração a precipitação, aferiram que a região sul do estado é a que apresenta o maior volume de precipitação, enquanto a norte, a que apresenta os menores volumes. Essas características são intensificadas pelo fato de a região norte do estado estar presente no bioma cerrado (de Mello and Viola 2013; Leite et al. 2018; Ricardo 2020) e por apresentar grande susceptibilidade à desertificação (Vinícius et al. 2017; De Almeida et al. 2020).

Na Figura 1 encontra-se o mapa do estado de Minas Gerais subdividido em mesorregiões.

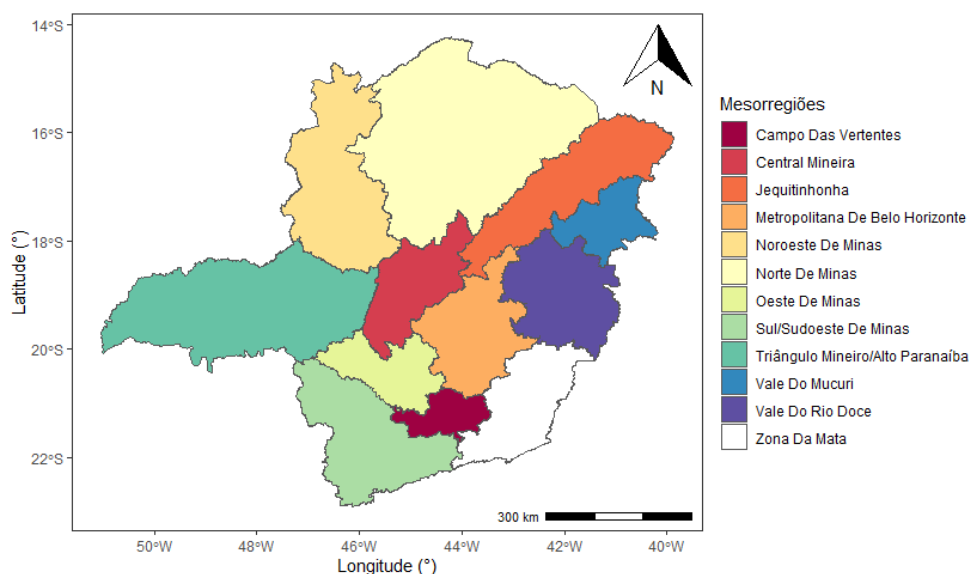


Fig. 1 Mesorregiões do estado de Minas Gerais.

2.2. Conjunto de dados de reanálise utilizados

Para a realização do estudo, foram utilizados conjuntos de dados de reanálise ERA5 horários (Hersbach et al. 2018) e mensais (Hersbach et al. 2019) obtidos na resolução de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ através da plataforma *Climate Data Store – Copernicus* no formato NetCDF, desenvolvido pela UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*) (Rew and Davis 1990). A partir de tais conjuntos, foram extraídas as variáveis de temperatura e de precipitação para os anos de 2009 a 2018 com as quais os balanços hídricos foram feitos e os índices climáticos calculados.

Todo o processo de manipulação de dados se deu através do ambiente R de programação, com o auxílio dos seguintes pacotes: *dplyr*, para a manipulação e a realização de operações (Wickham et al. 2021); *lubridate*, para o trabalho envolvendo dados no formato de data e hora (Grolemund and Wickham 2011); e *ncdf4*, para a manipulação dos arquivos em formato NetCDF (David Pierce 2019).

2.3. Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

Para a realização do balanço hídrico climatológico utilizou-se a metodologia de Thornthwaite and Mather. Para a sua execução, foram utilizadas como variáveis de entrada as séries de temperatura (C°) e de precipitação ($mm.mês^{-1}$) e a latitude de cada ponto de grade obtidas a partir dos dados de reanálise ERA5 (Hersbach et al. 2019)

para os anos de 2009 a 2018. Além disso, adotou-se CAD igual a 100 mm, como já realizado por diversos outros estudos (Guimarães et al. 2016; Vinícius et al. 2017).

Ao final do procedimento, os valores de EXC (mm) e DEF (mm) mensais foram agregados de acordo com as estações do ano: DJF (dezembro, janeiro e fevereiro), MAM (março, abril e maio), JJA (junho, julho e agosto) e SON (setembro, outubro e novembro). A realização de tais procedimentos foi executada com o auxílio da interface RStudio e do pacote ClimClass (Eccel et al. 2016).

2.4. Interpolação

Tendo sido calculados os valores de EXC e de DEF mensais para cada ponto de grade do conjunto de dados ERA5, com os resultados obtidos, foram elaborados mapas contendo as distribuições dos valores de déficit e de excedente para cada ano de 2009 a 2018 e para cada período agregado considerado (DJF, MAM, JJA e SON). Para que os resultados fossem exibidos em melhor resolução, aplicou-se o processo de interpolação linear a cada ponto de grade, de modo que os valores de DEF e EXC das coordenadas entre tais pontos de grades fossem preenchidos e a renderização da imagem suavizada. As fórmulas utilizadas para o processo de interpolação linear encontram-se descritas nas equações 1 e 2.

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (1)$$

Em que (X_0, Y_0) e (X_1, Y_1) , correspondem a duas coordenadas geográficas no formato longitude/latitude cujos valores são conhecidos e as coordenadas (X, Y) correspondem aos valores que serão interpolados.

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \cdot \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (2)$$

Os processos de interpolação foram realizados através das funções disponíveis no pacote *ggplot2* da interface RStudio (Wickham 2016).

2.5. Índices de Extremos Climáticos e SPI

Após o processo de construção dos mapas interpolados com os valores de EXC e DEF para os períodos DJF, MAM, JJA e SON e para os anos de 2009 a 2018, foram determinados os valores anuais dos índices CDD, CWD, Rx5Day, Rx1Day e PRCPTOT a partir do conjunto de dados horários de reanálise ERA5 convertidos em diários. Para a determinação do índice R95p utilizou-se como referência para os percentis os valores de precipitação de cada ponto de grade para o período de 1981 a 2010 obtidos a partir dos valores horários de precipitação (Hersbach et al. 2018). Para a determinação do SPI se fez uso da escala temporal anual (SPI 12 meses), levando-se em consideração os valores de precipitação acumulados dos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2009 a 2018.

Para a manipulação das séries de dados foram utilizadas as funções do pacote *dplyr* (Wickham et al. 2021); para a manipulação de dados horários, foram utilizadas as funções do pacote *lubridate* (Grolemund and Wickham 2011); por fim, para a determinação do SPI, utilizou o pacote *SPEI* (Beguería; and Vicente-Serrano

2017), responsável por ajustar a função Gama de densidade à distribuição de frequência de precipitação de cada ponto de grade (Sousa et al. 2016).

2.6. Normalização dos Índices de Ameaça Climática

Uma vez calculados os valores dos índices de ameaça climática de chuvas intensas (IAC_{chuvas}) e de secas (IAC_{seca}), estes foram normalizados para que se encontrassem no intervalo de 0 a 1. Tal processo facilita a interpretação e a interação entre tais índices. O método de normalização utilizado encontra-se formulado na equação 3.

$$IAC_{normalizado} = \frac{IACx - Menor\ IAC}{Maior\ IAC - Menor\ IAC} \quad (3)$$

Em que $IACx$ corresponde ao valor de determinado índice, “Maior IAC” e “Menor IAC” aos maiores e menores índices calculados obtidos, respectivamente. Através de tal processo, todos os valores calculados passam a encontrar-se dispostos no intervalo de 0 a 1 e classificados quanto à ameaça da seguinte forma: 0 – 0,2 (Muito Baixo); 0,21 – 0,4 (Baixo); 0,41 – 0,6 (Normal); 0,61 – 0,8 (Alto); 0,81 – 1,0 (Muito Alto).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cálculo do balanço hídrico a partir do conjunto de dados de reanálise mensais (ERA5), os valores de déficit e de excedente hídricos foram determinados na unidade de milímetros e agregados segundo o ano e as estações deste. As siglas utilizadas como referência às estações do ano são as seguintes: DJF (verão), MAM (outono), JJA (inverno) e SON (primavera). Os resultados obtidos, para o conjunto de reanálise, encontram-se presentes nas Figuras 2 a 9.

Tendo sido concluídas as representações referentes aos valores de DEF e EXC, prosseguiu-se à construção dos mapas referentes aos valores dos índices de extremo climáticos e ao SPI. Os resultados encontram-se representados nas Figuras de 10 a 18.

BHC ERA5 - DJF

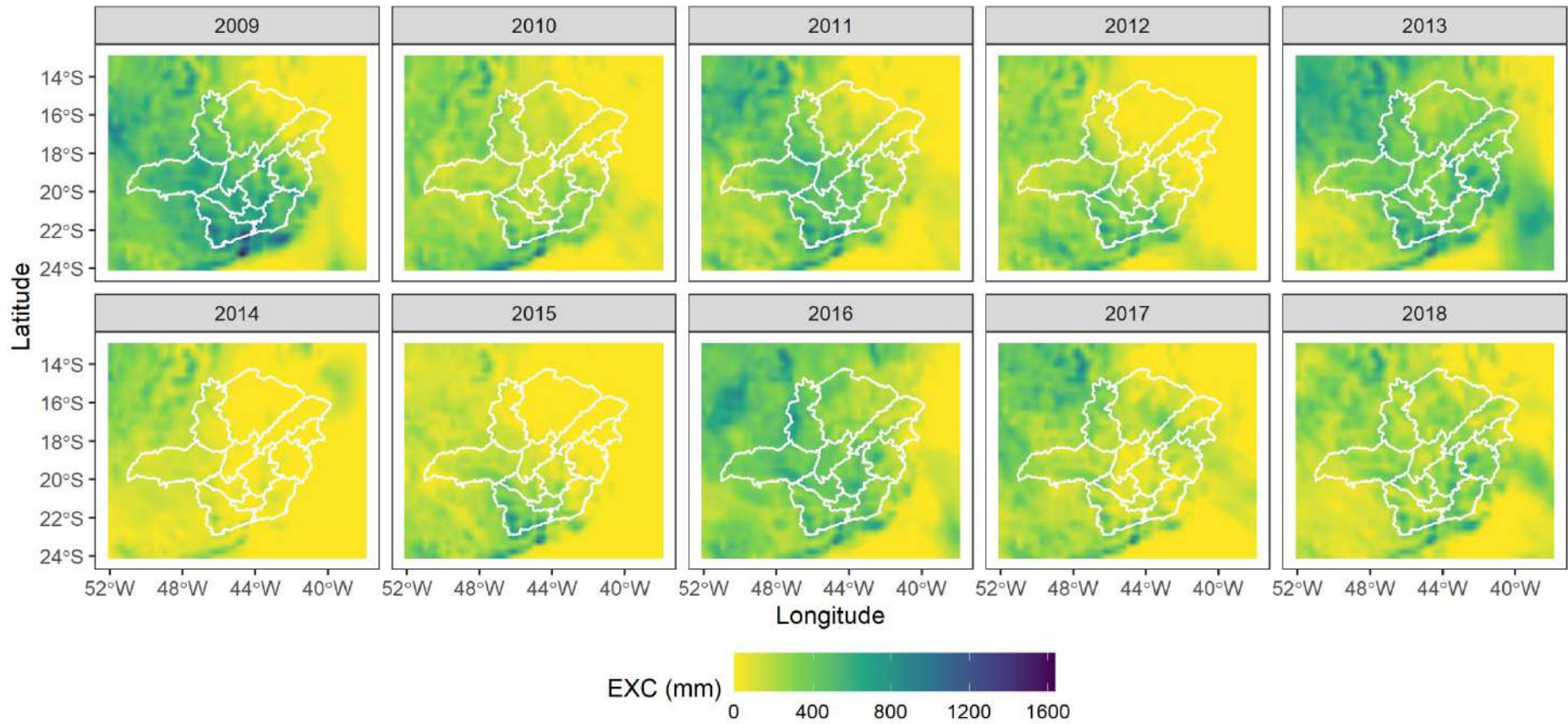


Fig. 2 Excedente hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período DJF.

BHC ERA5 - MAM

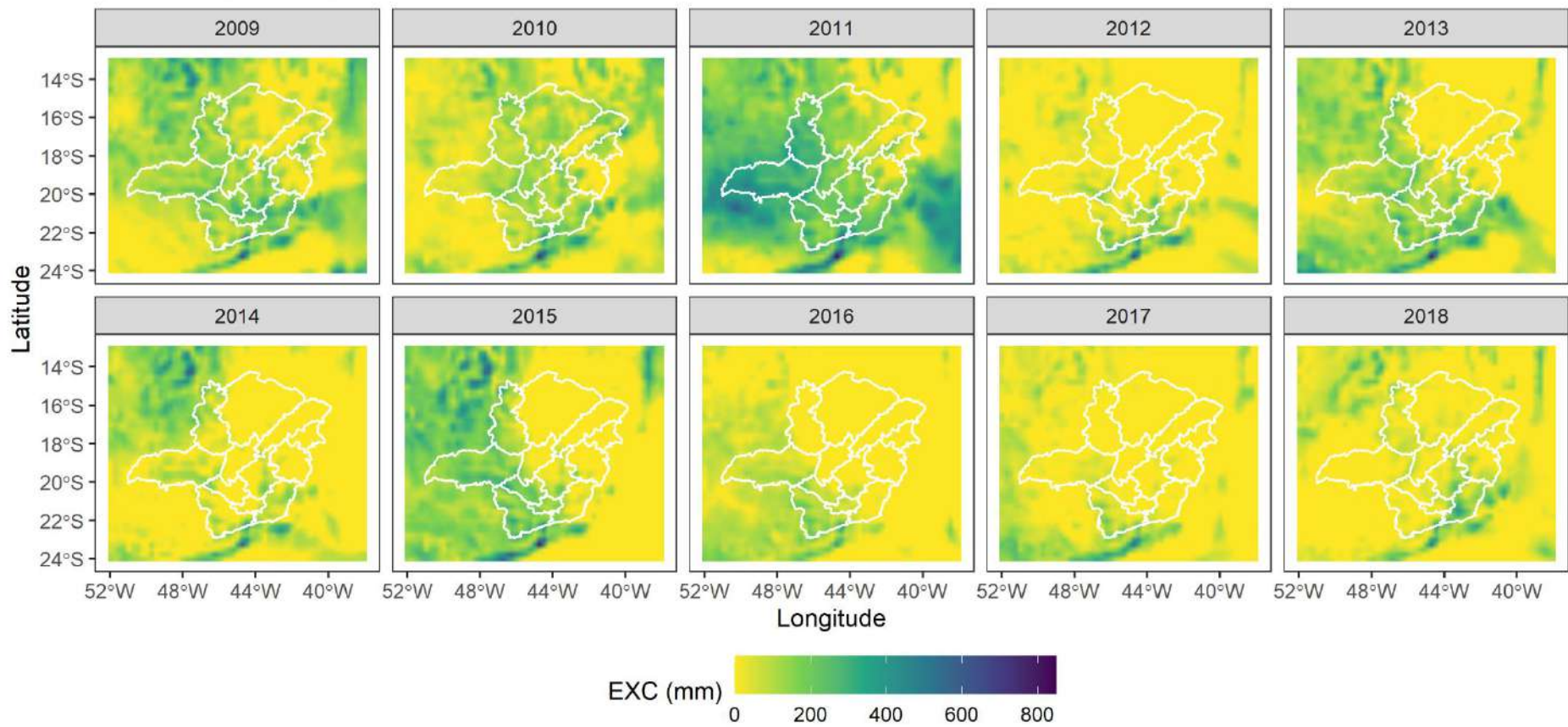


Fig. 3 Excedente hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período MAM.

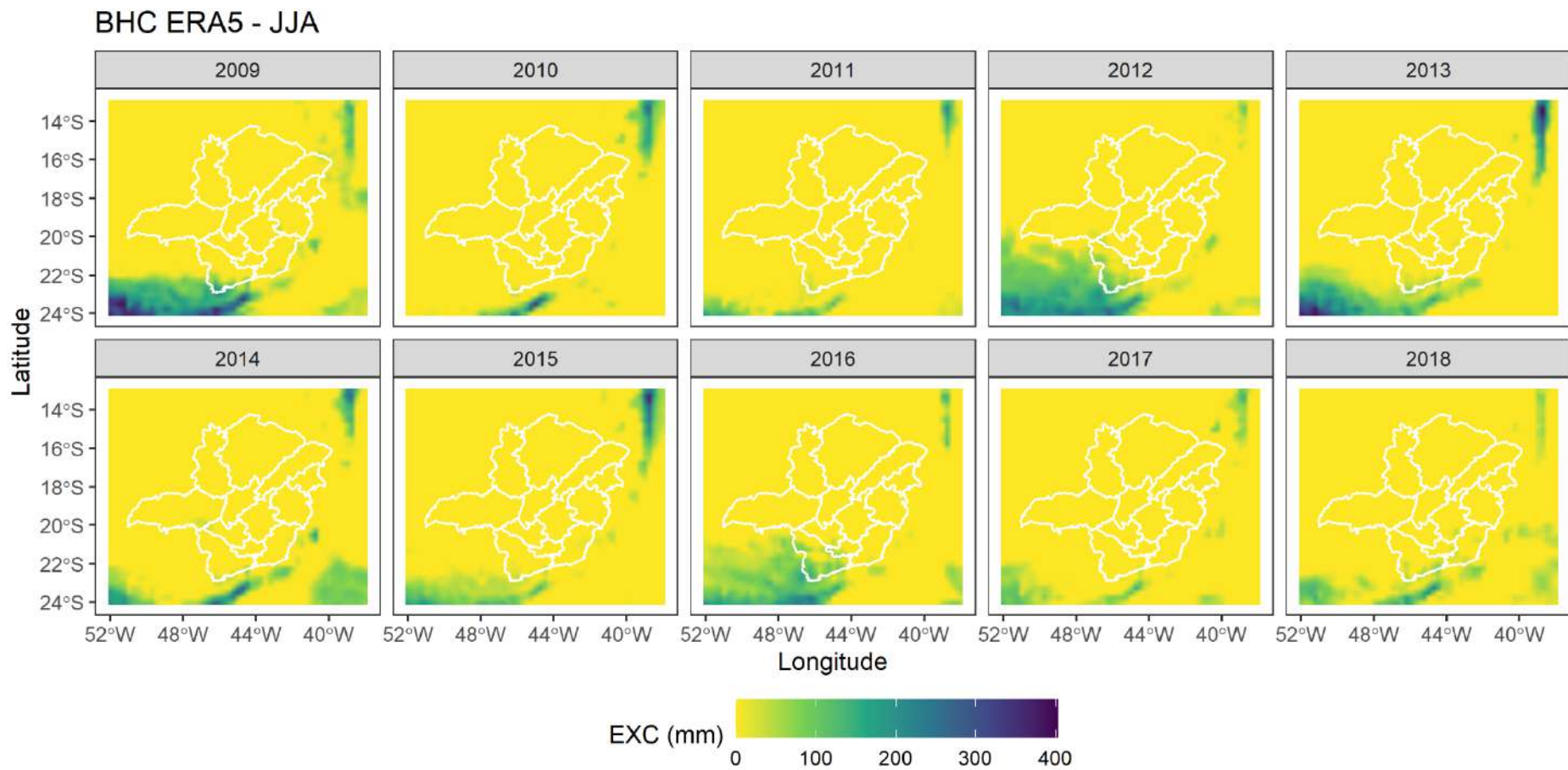


Fig. 4 Excedente hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período JJA.

BHC ERA5 - SON

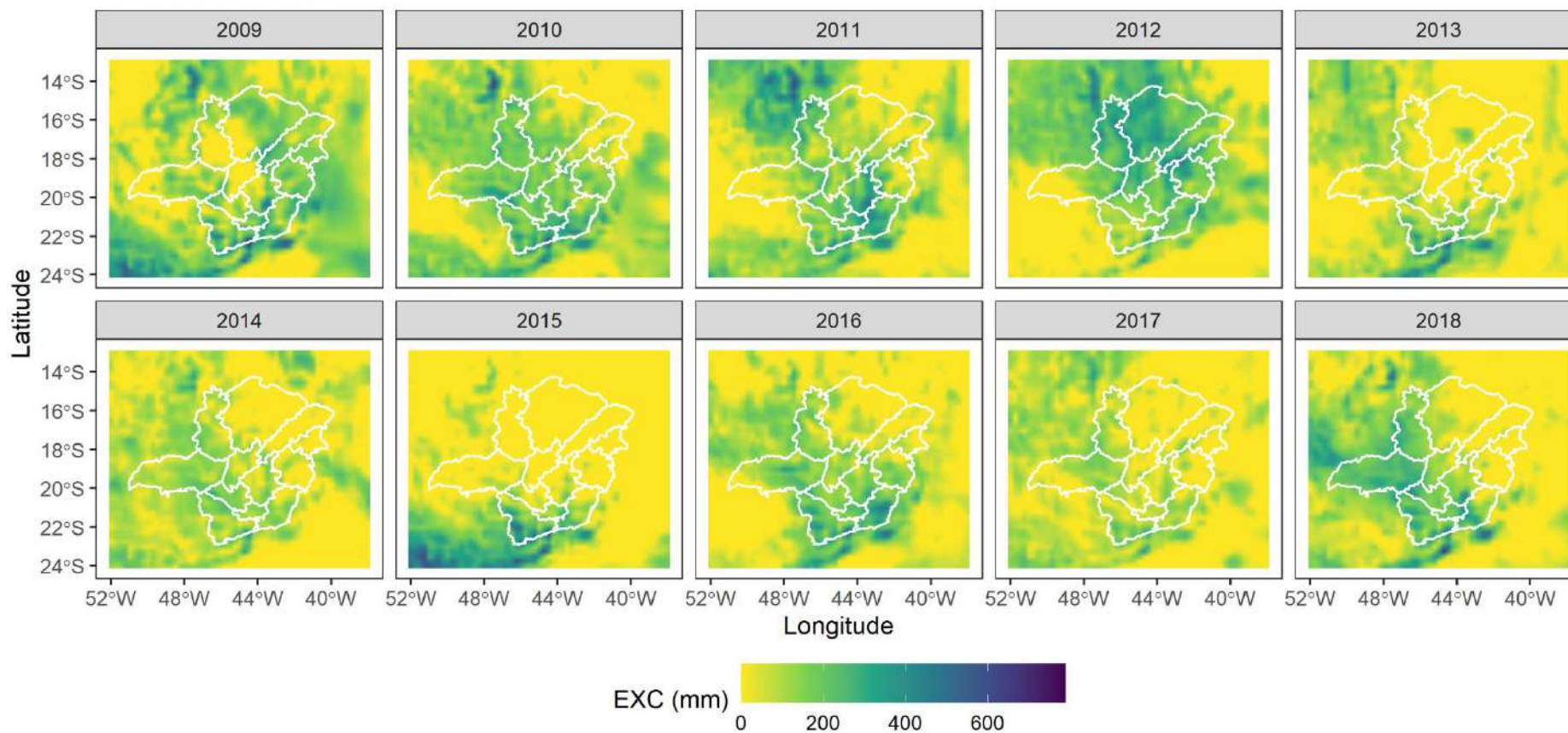


Fig. 5 Excedente hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período SON.

BHC ERA5 - DJF

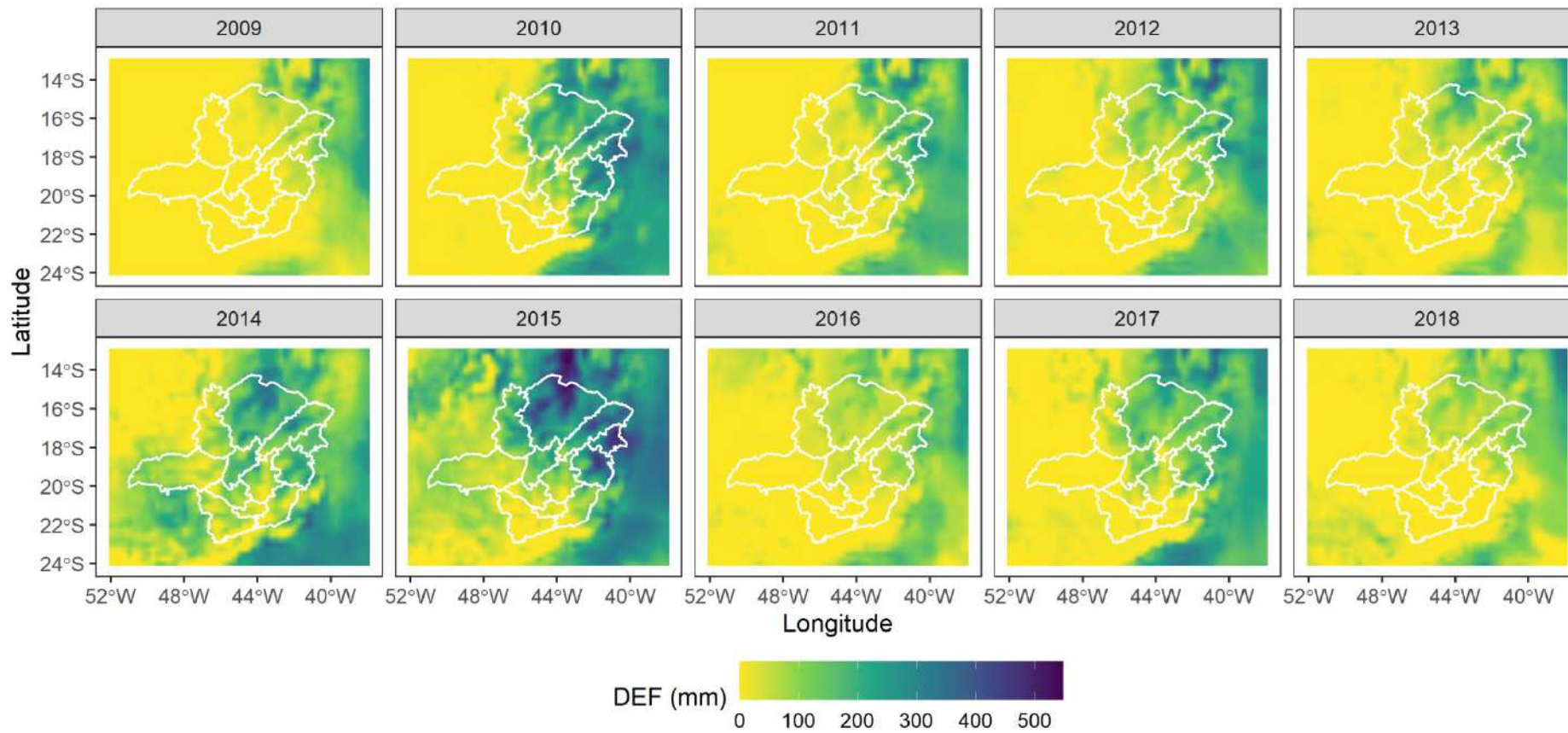


Fig. 6 Déficit hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período DJF.

BHC ERA5 - MAM

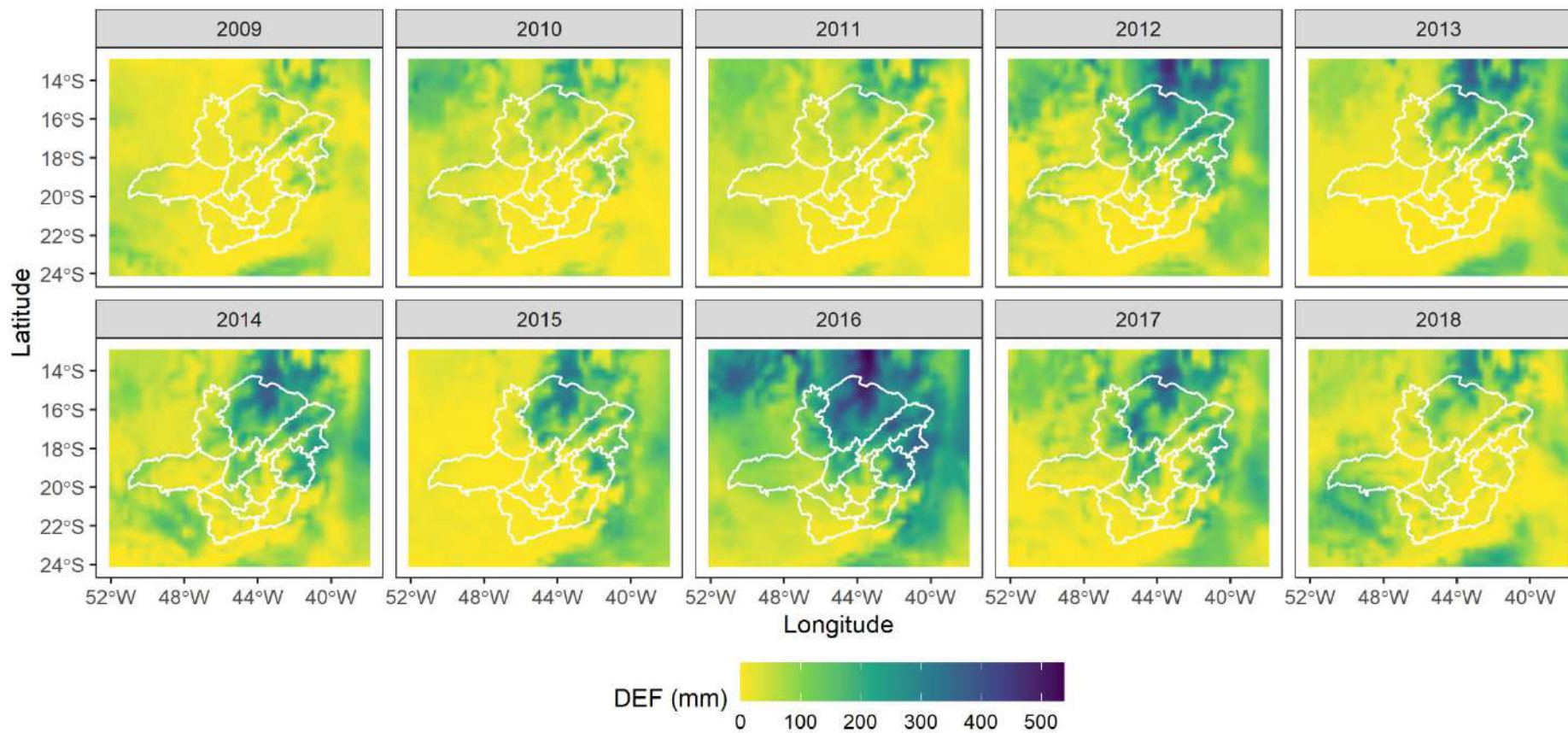


Fig. 7 Déficit hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período MAM.

BHC ERA5 - JJA

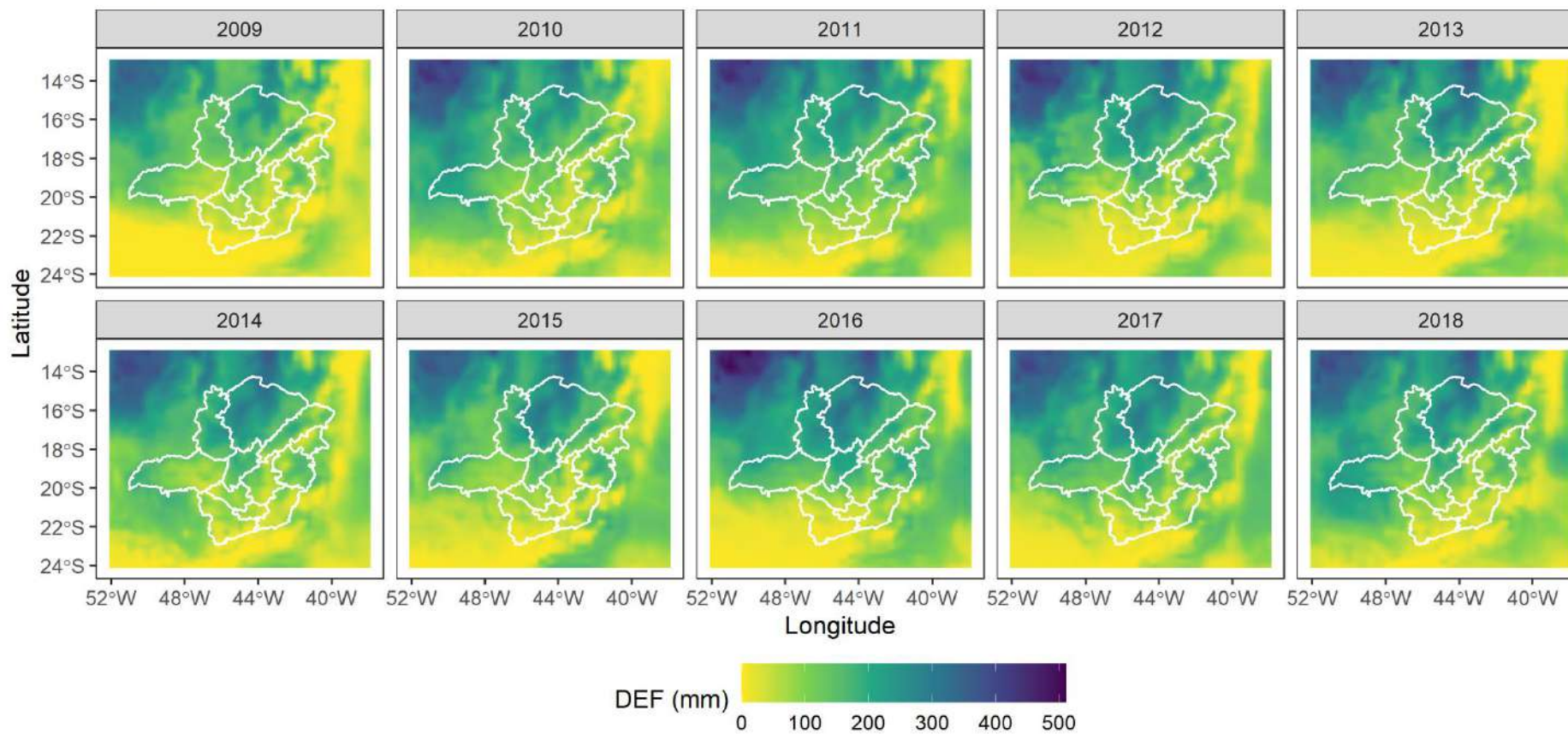


Fig. 8 Déficit hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período JJA.

BHC ERA5 - SON

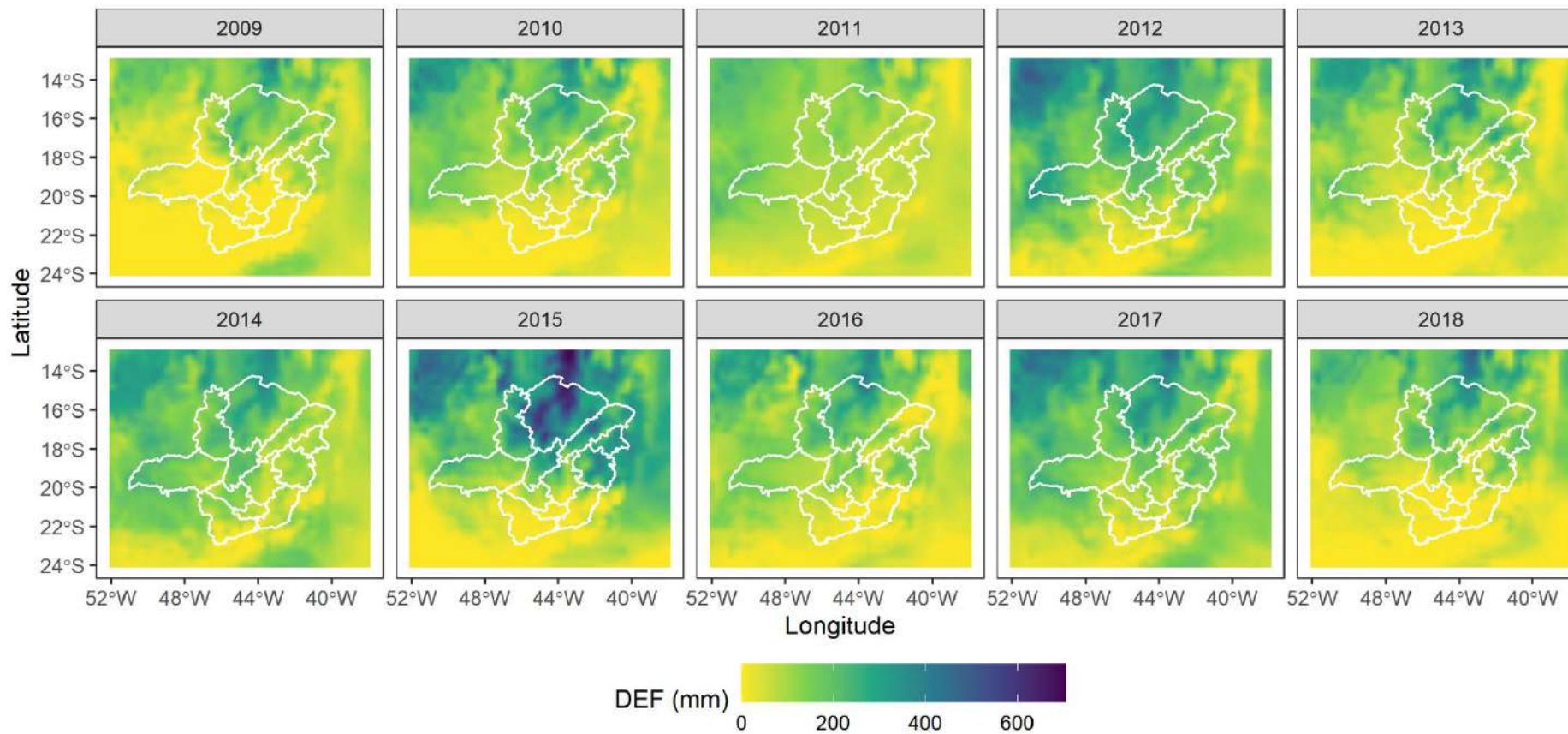


Fig. 9 Déficit hídrico (mm) determinado para o estado de Minas Gerais nos anos de 2009 a 2018 para o período SON.

Precipitação Anual Total (PRCPTOT)

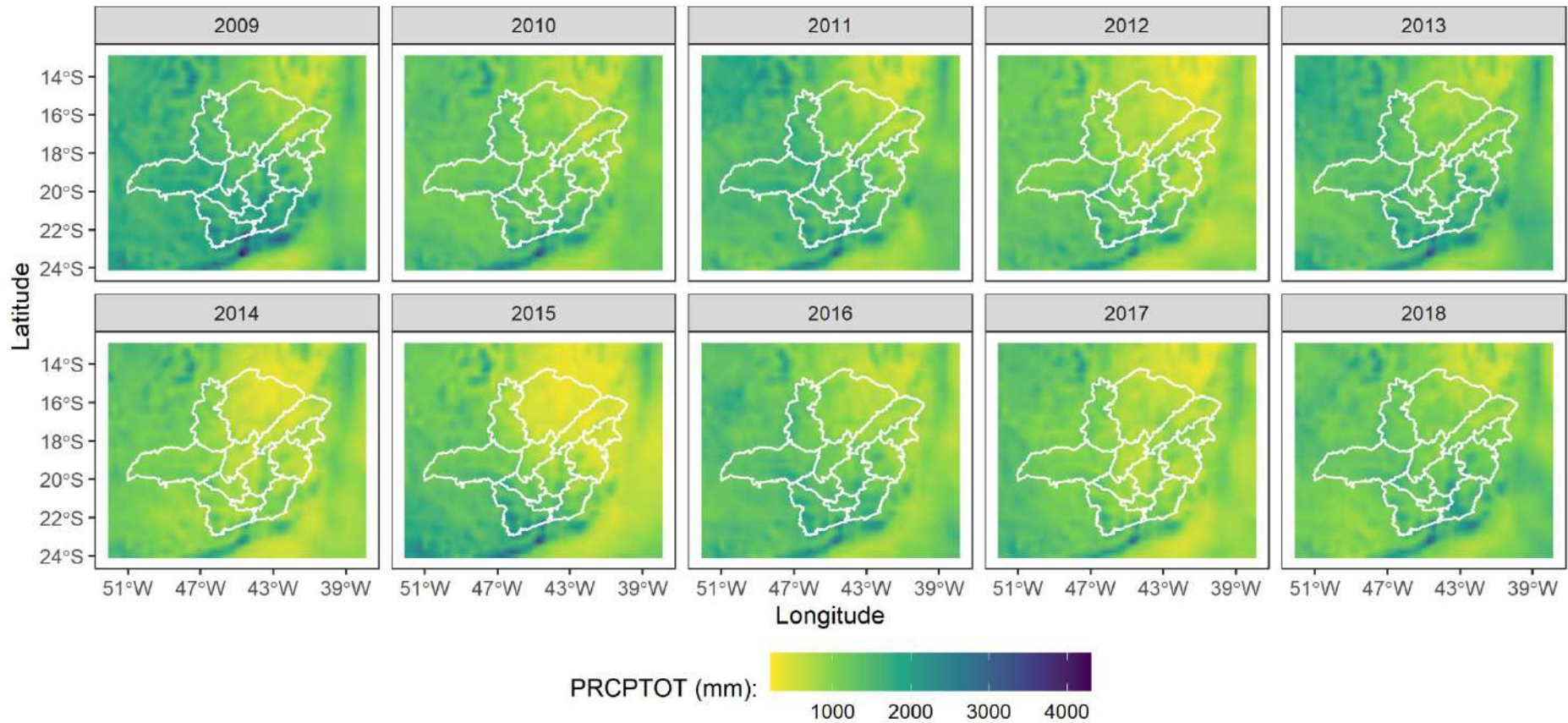


Fig. 10 Precipitação Total Anual para os anos de 2009 a 2018.

Máxima Precipitação Anual de 1 dia (Rx1day)

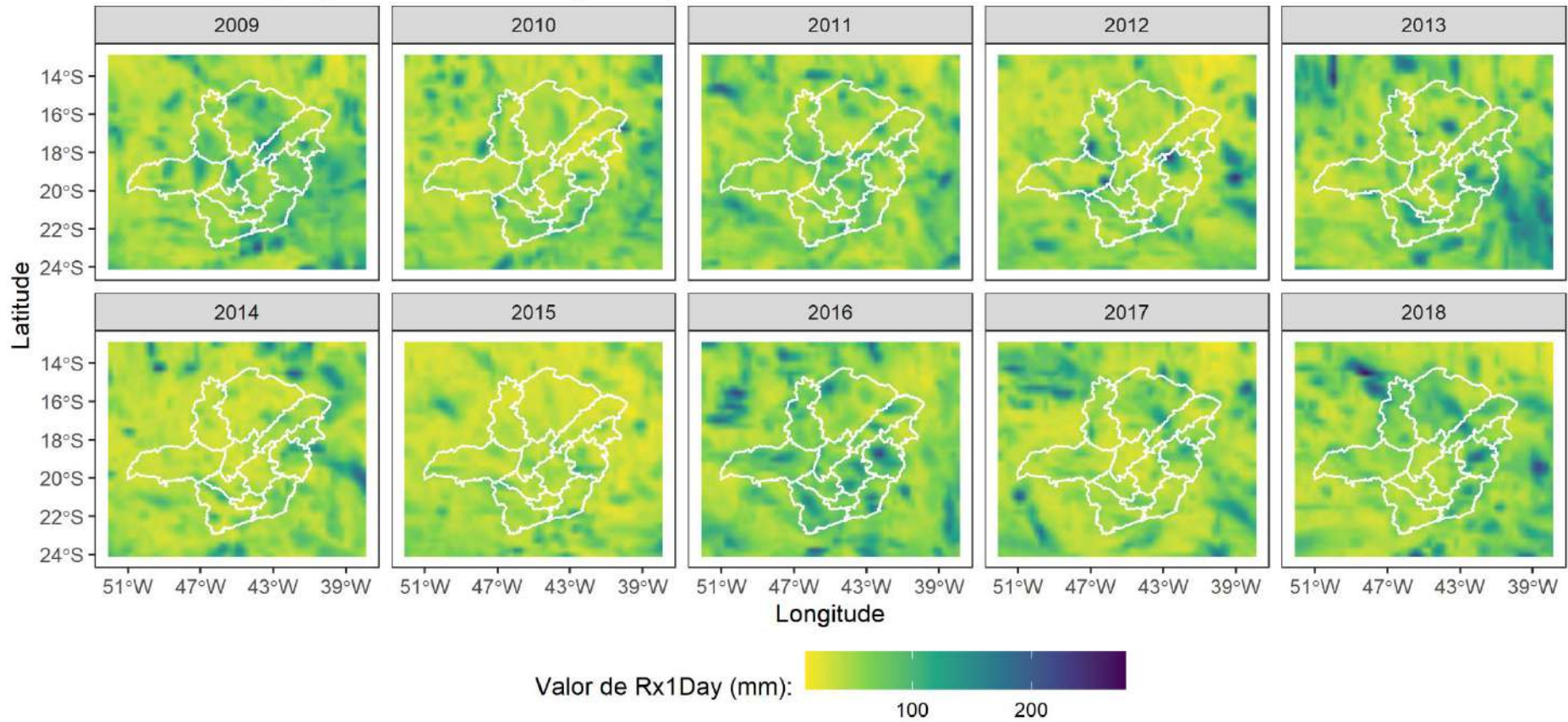


Fig. 11 Máxima Precipitação Anual de 1 dia para os anos de 2009 a 2018.

Máxima Precipitação Anual de 5 dias consecutivos (Rx5day)

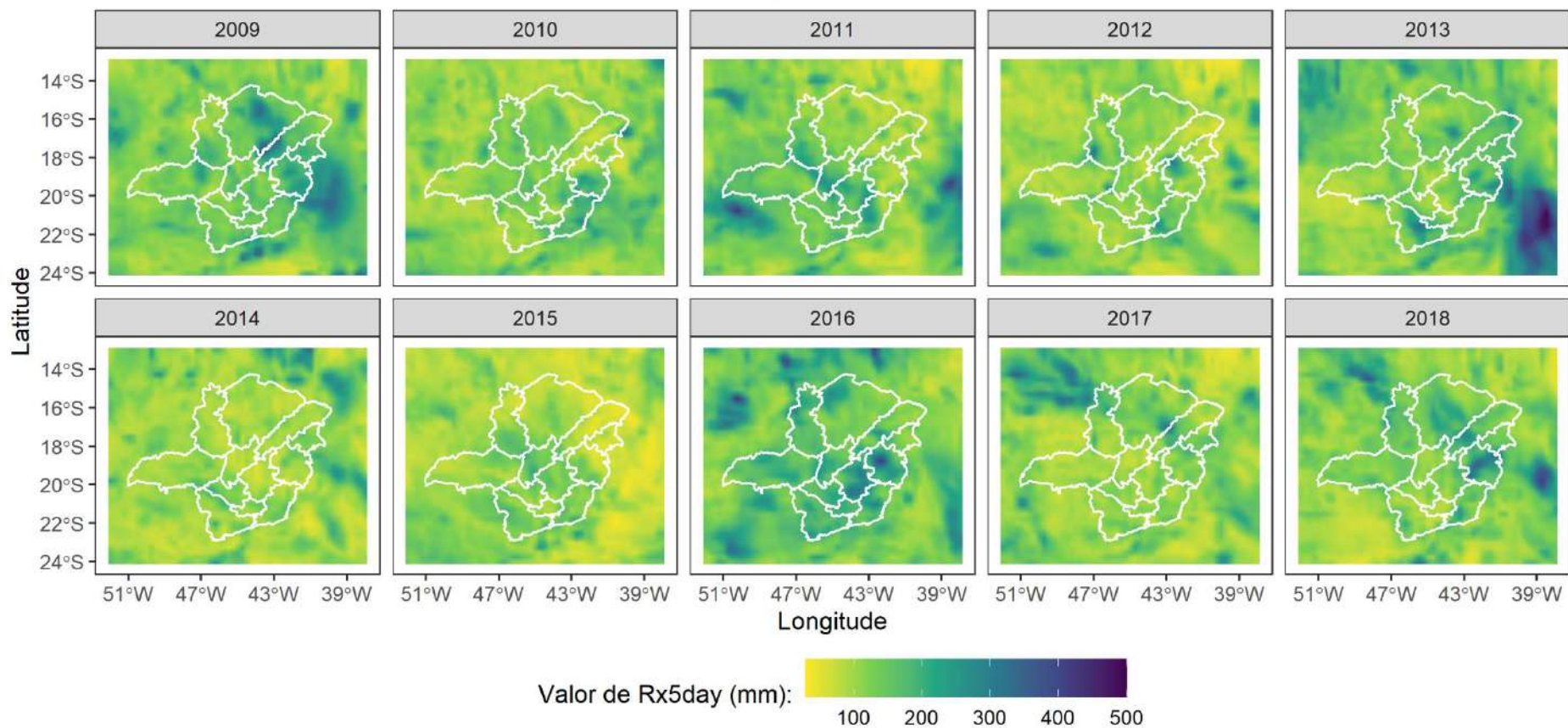


Fig. 12 Máxima Precipitação Anual de 5 dias consecutivos para os anos de 2009 a 2018.

Precipitação Total Anual superior ao percentil 95 (1981-2010)

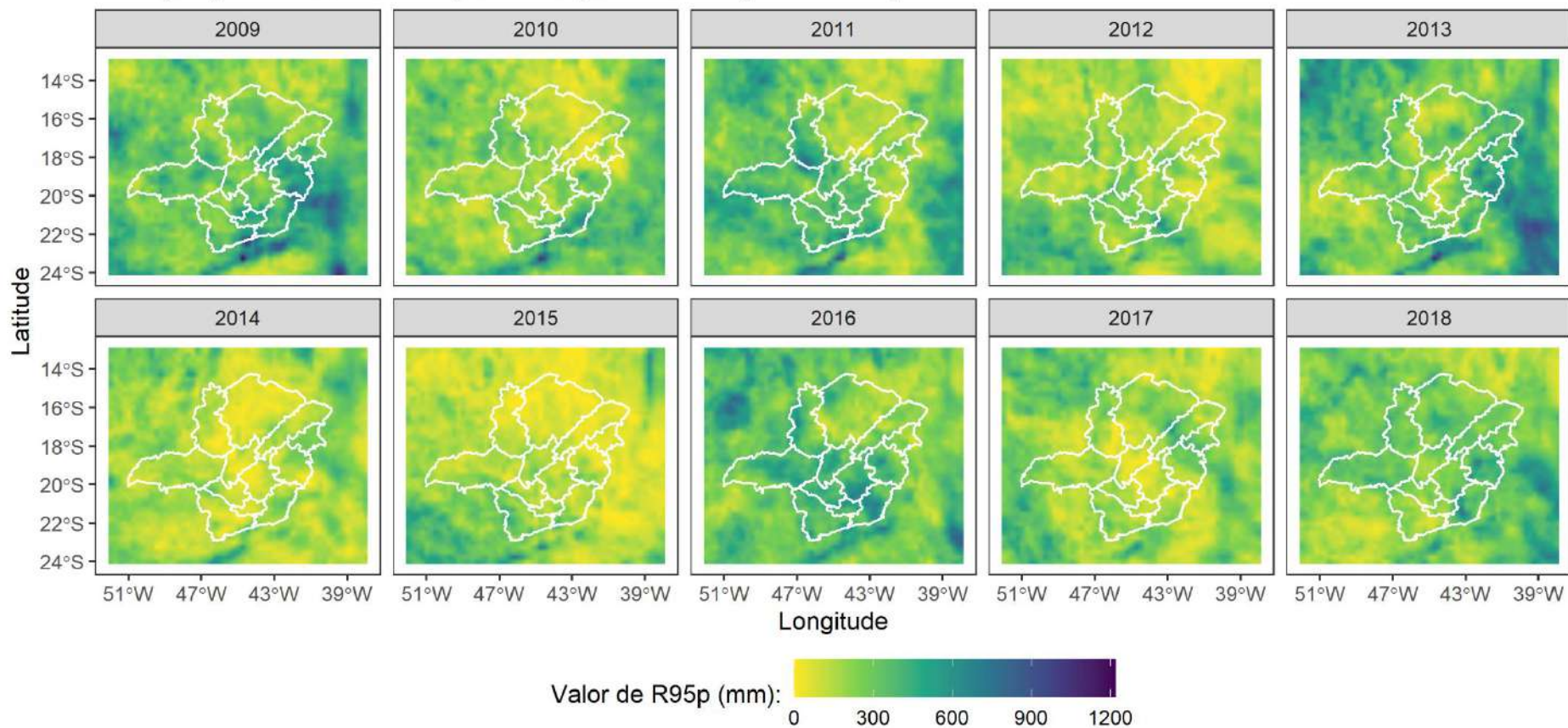


Fig. 13 Precipitação Total Anual superior ao percentil 95 (1981-2010) para os anos de 2009 a 2018.

Máximo Número de Dias Consecutivos Secos (CDD)

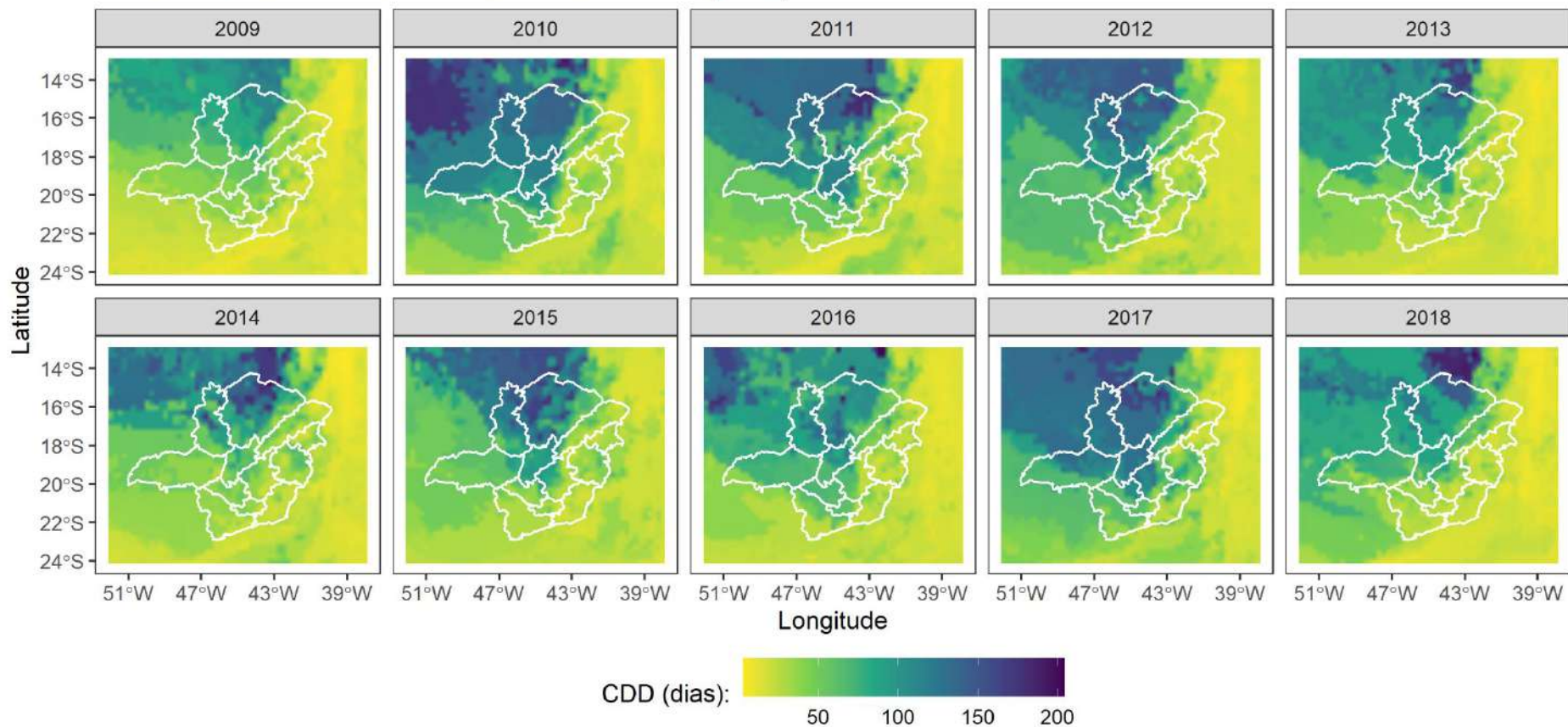


Fig. 14 Máximo Número de Dias Consecutivos Secos para os anos de 2009 a 2018.

Máximo Número de Dias Consecutivos Úmidos (CWD)

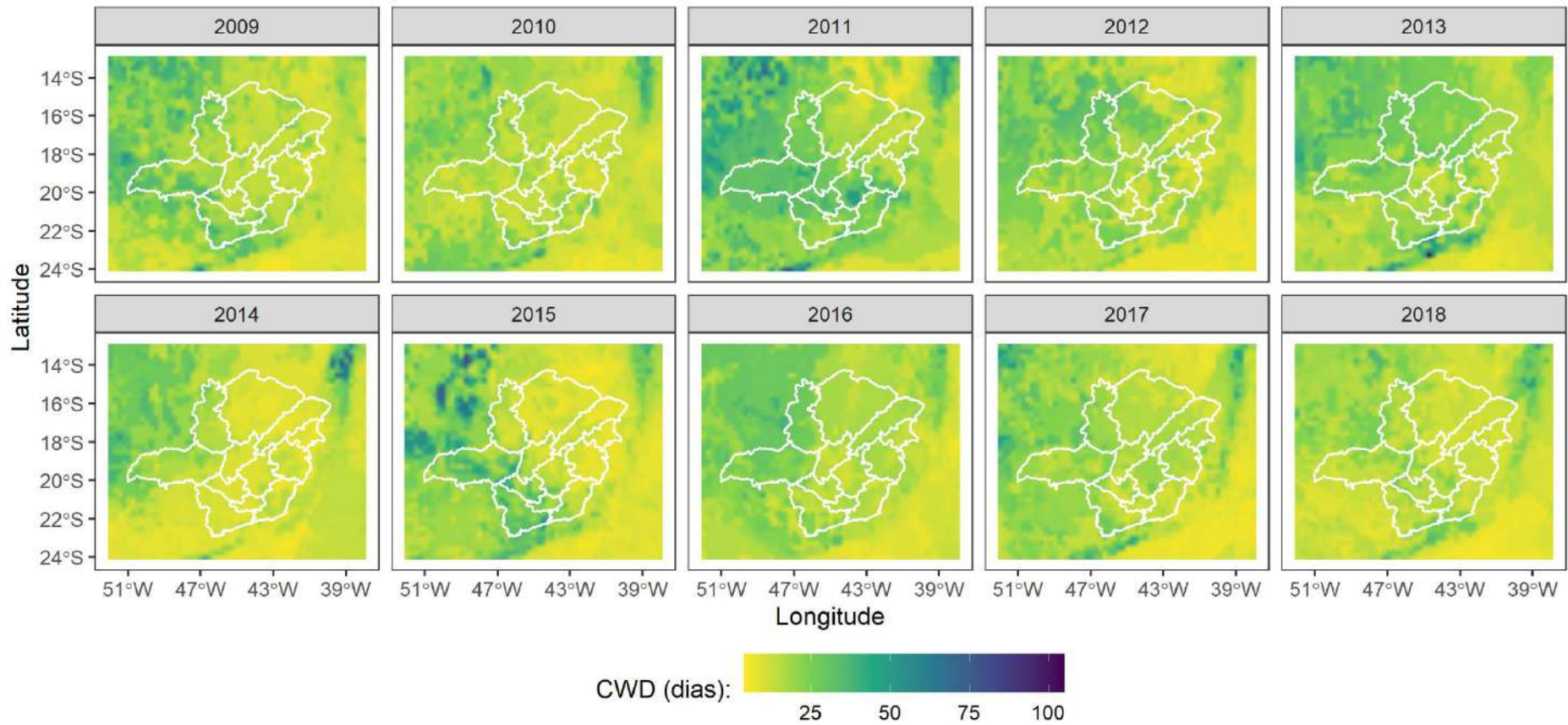


Fig. 15 Máximo Número de Dias Consecutivos Úmidos para os anos de 2009 a 2018.

Índice de Precipitação Padronizado Anual (SPI)

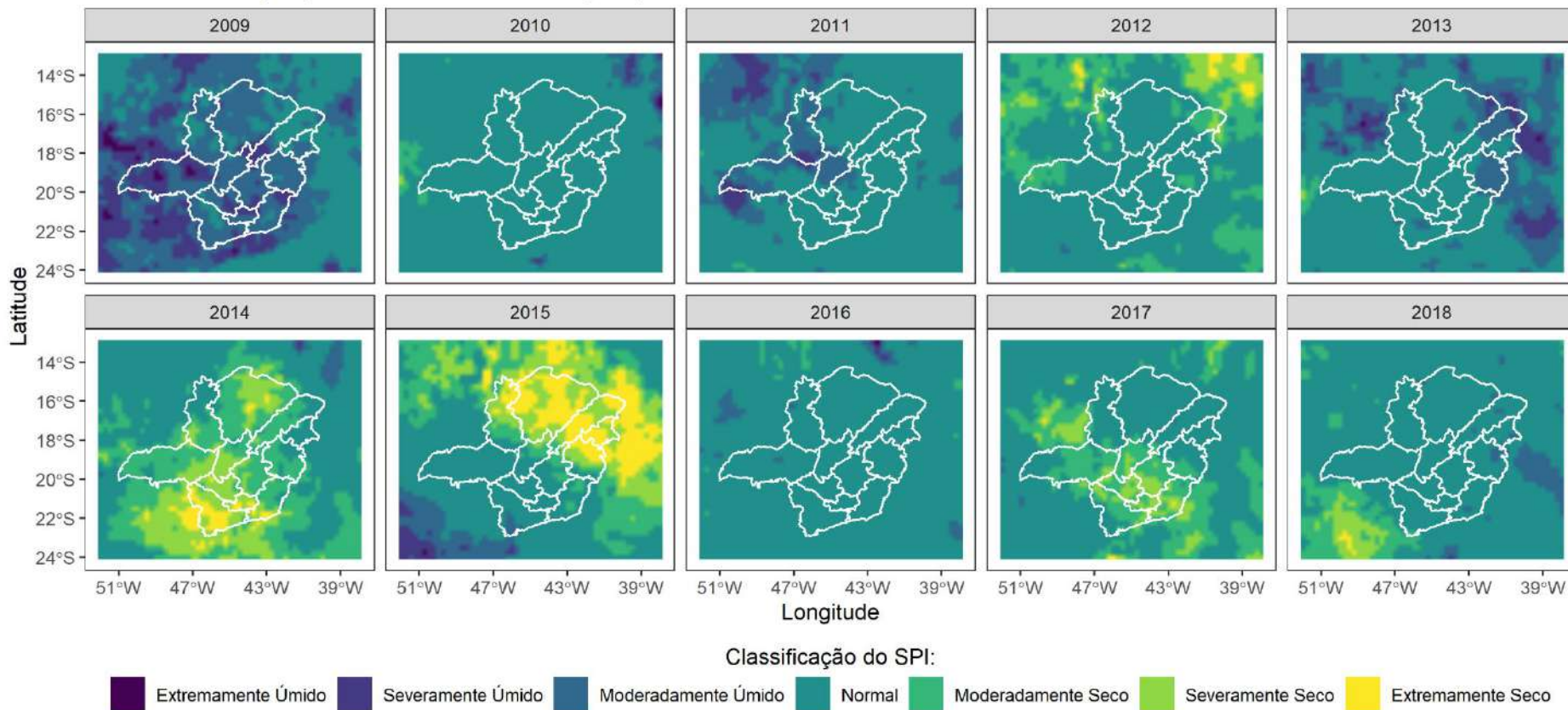


Fig. 16 Índice Padronizado de Precipitação Anual (SPI) para os anos de 2009 a 2018.

Índice de Ameaça Climática de Seca

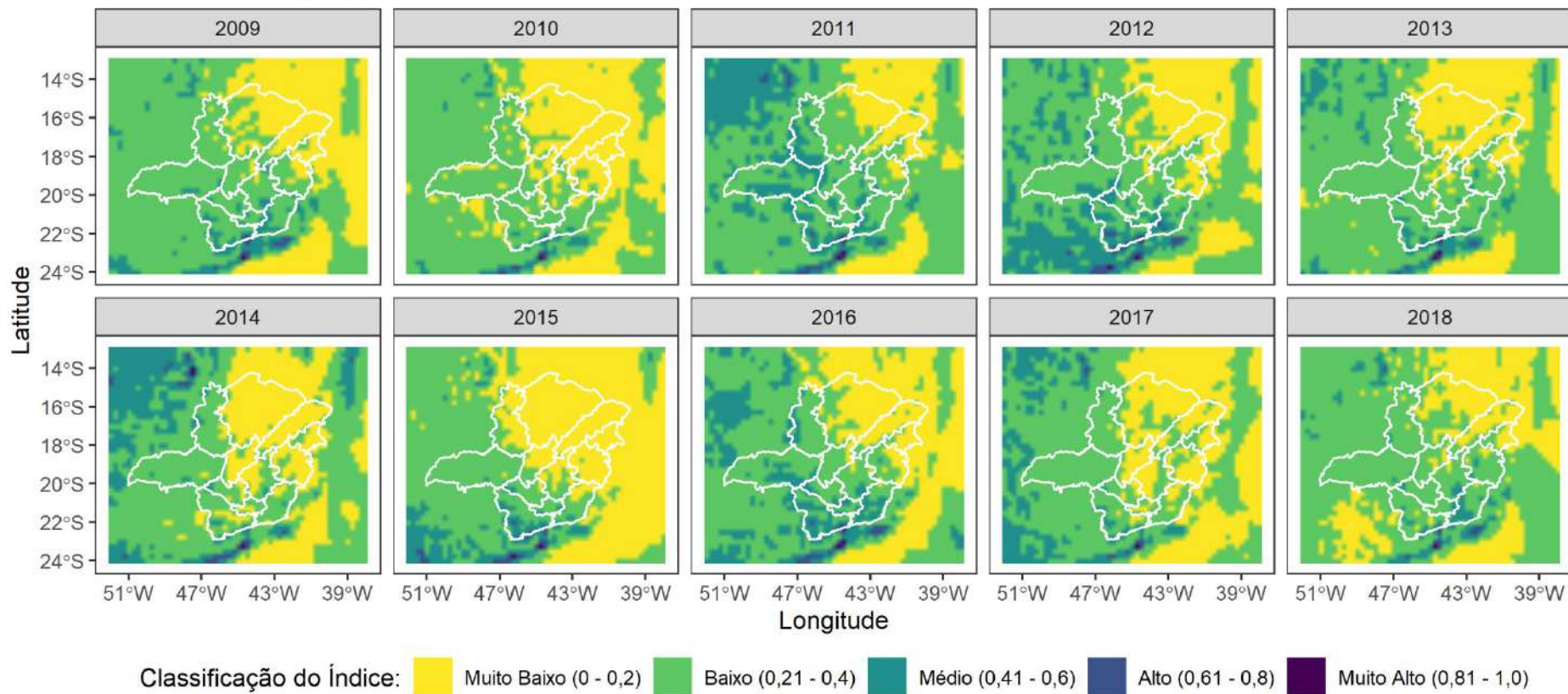


Fig. 17 Índice de Ameaça Climática de Seca para os anos de 2009 a 2018.

Índice de Ameaça Climática de Chuvas Intensas

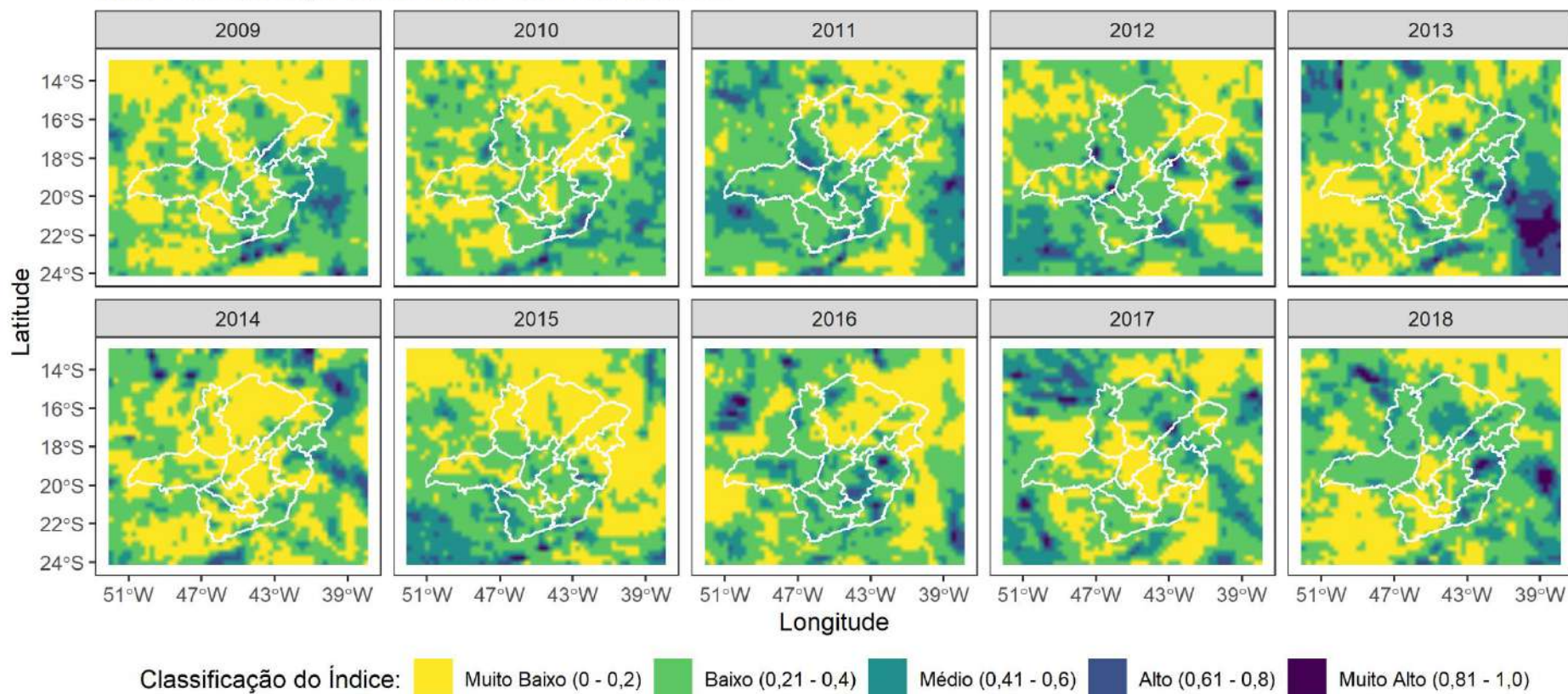


Fig. 18 Índice de Ameaça Climática de Chuvas Intensas para os anos de 2009 a 2018.

Tratando-se dos valores obtidos por meio dos balanços hídricos realizados com o conjunto ERA5, pode-se verificar que, para o período DJF, os valores de excedente hídrico são menores nas mesorregiões mais ao norte do estado (Noroeste de Minas, Norte de Minas e Jequitinhonha); levando-se em consideração os valores de déficit hídrico (~200 mm em anos anteriores a 2014) obtidos, é possível de se verificar a relação inversa, uma vez que as mesorregiões situadas mais ao norte do estado apresentaram os maiores valores de déficit (Figura 6).

Estudos elaborados levando-se em consideração o estado de MG verificaram que a porção norte do estado de Minas Gerais apresenta características mais áridas e um menor volume de precipitação (de Mello and Viola 2013), ao contrário da porção sul, que apresenta características mais úmidas, com um regime de chuvas mais regular (Reboita et al. 2015).

Além disso, por meio dos valores de déficit calculados, é possível de se verificar o elevado déficit hídrico (valores próximos a 500 mm nas mesorregiões supracitadas) ocorrido a partir do ano de 2013, o que condiz com o problema de escassez hídrica pelo qual o estado de Minas Gerais havia passado na época, o que culminou em racionamentos, problemas de abastecimento e em muitos municípios decretando estado de emergência, dada a falta de chuva em muitas localidades do estado (Welbert 2015).

Se na estação mais úmida (DJF), caracterizada por um maior volume de precipitação, os valores de excedente e de déficit demonstraram as variações existentes entre as mesorregiões situadas ao norte e ao sul do estado, tratando-se do período JJA (inverno austral), no qual o volume de precipitação é menor e as temperaturas são mais baixas (Silva and Reboita 2013), o resultado dos balanços hídricos indicou o elevado déficit hídrico pelo qual praticamente todo o estado de MG passou ao longo dos anos de 2009 a 2018.

Ao longo de tal período, o DEF obtido era superior a 250 mm em grande parte das mesorregiões do estado. A exceção a tais valores elevados de DEF encontram-se nas mesorregiões mais ao sul do estado (Sul/Sudoeste de Minas e Zona da Mata, por exemplo), que apresentaram valores de EXC próximos a 100 mm.

Levando-se em consideração os demais períodos (MAM e SON), cujas características não são tão acentuadas quanto aquelas observadas nos períodos DJF e JJA, os resultados avaliados demonstraram que, para o período MAM, os maiores valores de DEF encontram-se na parcela norte do estado, na qual foram encontrados valores (~200 mm) similares àqueles verificados no período DJF; tais valores, se avaliados ao longo dos anos, apresentaram intensificação a partir do ano de 2012, com destaque para a mesorregião Norte de Minas, cujos valores foram superiores a 300 mm em grande parte dos anos subsequentes.

Tratando-se do período SON, o mesmo padrão de regionalização se repetiu, uma vez que as mesorregiões localizadas mais ao norte (acima da Central Mineira) apresentaram, mais uma vez, os maiores valores de DEF (~200 mm), com destaque para o ano de 2015, no qual estes valores foram superiores aos observados nos demais anos, atingindo os 500 mm, aproximadamente.

Além das análises provenientes dos resultados obtidos com a realização dos balanços hídricos climatológicos, que permitiram a verificação da variabilidade existente entre as regiões norte e sul do estado de MG, principalmente, resta ainda o destaque aos resultados obtidos a partir dos índices calculados que, mais uma vez, reforçaram o padrão climático existente no estado.

Levando-se em consideração os valores de precipitação total anual (PRCPTOT) (Figura 10) que foram verificados ao longo dos anos de 2009 a 2018, pode-se notar que os maiores volumes de chuva se encontram presentes nas porções mais ao sul do estado, o que está de acordo com os valores de DEF e EXC calculados para essa mesma região que, invariavelmente, tenderão a ser mais baixos quando em relação às demais regiões do estado. Na porção norte do estado, por exemplo, para os anos de 2014 a 2016, os totais anuais de precipitação apresentaram valores próximos a 1000 mm.

O maior volume de precipitação da parte sul do estado de MG decorre do fato desta região ser mais afetada por frentes frias do que a porção norte. A ocorrência de tais frentes frias, quando associadas à umidade oriunda da região amazônica transportada pelos jatos de baixos níveis, corroboram com a formação das ZCAS, responsáveis por grandes volumes de precipitação. Porém, além das frentes frias, a localização do ASAS também pode influenciar no volume de chuvas da porção sul do estado; quando afastado do continente, o ASAS contribui com a entrada de umidade no continente, favorecendo atividades convectivas (Silva and Reboita 2013).

Em conformidade com tais resultados estão os valores encontrados para os índices CDD e CWD. Este, referente aos dias úmidos consecutivos, demonstrou que a porção sul e centro-oeste de MG, é a que apresenta a maior quantidade de dias úmidos, com uma quantidade variando entre 25 e 50 dias úmidos consecutivos ao longo de todos os anos do período de 2009 a 2018; aquele, por sua vez, referente aos dias secos consecutivos, demonstra que as mesorregiões localizadas na parte norte do estado são as que passam a maior quantidade de dias sem chuva (~ 100 dias secos consecutivos por ano).

Quando avaliados os resultados obtidos para os índices Rx1Day, Rx5Day, pode-se verificar o efeito dos baixos índices pluviométricos no estado durante os anos de 2014 e 2015, uma vez que, em tais anos, os valores máximos de precipitação de 1 dia e de 5 dias consecutivos foram inferiores aos observados nos anos anteriores (< 100 mm para Rx1Day em 2014 e 2015, e < 200 mm para os mesmos anos do índice Rx5Day). Apesar da diminuição observada em tais índices ao longo dos anos de 2014 e 2015, estes voltaram a apresentar valores mais elevados já no ano de 2016, tanto na porção sul quanto na região norte, que apresentou, nesse ano, valores mais elevados de precipitação anual e uma maior quantidade de dias úmidos consecutivos.

Como forma de se avaliar os valores extremos de precipitação em comparação à normal climatológica mais recente (1981 – 2010), determinou-se os valores do índice R95p, responsável por verificar os valores de precipitação anual superiores ao percentil 95 de 30 anos. A partir dos resultados obtidos, mais uma vez, torna-se nítido que, embora nos anos de 2009 a 2013, os valores encontrados tenham sido elevados (> 350 mm em grande parte do estado), nos anos de 2014 e de 2015, os valores apresentaram diminuição, demonstrando que, em tais anos, os volumes anuais precipitados não foram muito superiores aos extremos apresentados pelo período de 1981 a 2010.

Apesar do padrão verificado ao longo dos anos e das regiões do estado por intermédio dos índices citados anteriormente, para que indícios de secas pudessem ser averiguados, procedeu-se com a determinação do índice padronizado de precipitação anual (SPI), por meio do qual pode-se verificar que, de maneira geral, o estado de Minas Gerais sempre apresentou valores considerados normais (Z entre -1 e +1) ao longo dos anos, devendo-se destacar os anos de 2009, no qual os valores obtidos foram mais elevados, caracterizando condições úmidas, e os anos de 2014 e de 2015, nos quais valores mais baixos, que caracterizam condições de seca, foram encontrados

nas porções sul (2014) e norte (2015) (Cunha et al. 2019). Entretanto, apesar de tal classificação, a partir do ano de 2016 os valores de SPI foram restabelecidos à normalidade novamente.

Se tais classificações forem comparadas com os monitoramentos de secas elaborados pelo CPTEC-INPE (INPE 2021), poderá se verificar que, levando-se em conta apenas os valores de SPI negativos, que a ocorrência de secas no estado foi intensa durante os anos de 2014 e 2015, recebendo classificações de extrema e excepcional para grande parte de seu território. Tais classificações, que levam em consideração apenas os valores negativos de SPI, estão de acordo com os elaborados a partir do conjunto de dados ERA5, que também apresentou as maiores intensidades de seca nos anos de 2014 e 2015, e a menor no ano de 2009, no qual determinadas regiões foram classificadas até mesmo como extremamente úmidas.

Tendo sido calculados todos os índices citados anteriormente, realizou-se a determinação dos índices de ameaça climática de chuvas intensas e de seca, segundo metodologia da AdaptaBrasil MCTI. Tratando-se do IAC de chuvas intensas, os valores obtidos demonstraram que, de maneira geral, o estado de MG apresenta uma baixa ameaça atrelada à ocorrência de chuvas intensas, tendo apenas algumas poucas localidades que apresentaram valores de ameaça seja média ou superior ($> 0,41$).

Os valores obtidos são coerentes com os obtidos para os índices CWD e CDD, através dos quais é possível de se perceber que a ocorrência de dias secos consecutivos é superior à ocorrência de dias úmidos em praticamente todo o estado, com destaque para a porção norte do estado, na qual até mesmo durante o período DJF os valores de DEF são mais elevados durante o verão.

Tratando-se do IAC de seca, este demonstrou, da mesma forma, que a maior parte do estado apresenta uma ameaça classificada como baixa (IAC seca $< 0,40$), com destaque para as porções norte, leste e central do estado; tratando-se da porção localizada mais ao sul, esta foi a que apresentou o maior grau de ameaça, tendo apresentado, para algumas localidades, ameaças consideradas como média, alta e, até mesmo, muito alta.

Tal resultado, demonstrado pelo IAC de seca, demonstrou que, apesar de os demais índices calculados permitirem a inferência de que a porção norte do estado de MG é a mais suscetível à ocorrência de secas, o risco de ameaça para tal região é classificado como baixo. Ainda que tal índice não demonstre um elevado risco de ameaça climática de seca, os valores de DEF e de EXC averiguados pela aplicação do BHC tornam possível a percepção de que existe uma elevada deficiência no solo da porção norte de MG. Cabe ressaltar que, devido ao processo de normalização, a interpretação dos valores dos índices de ameaça deve ser feita de maneira relativa aos demais.

Por fim, cabe ainda discorrer acerca do efeito das teleconexões nos valores dos índices calculados. Dentre os anos nos quais houveram intensas ocorrências de El Niño estão os anos de 2010 e de 2015 (Marengo et al. 2018), nos quais também foram verificadas condições de seca e de elevados déficits hídricos; apesar disso, dentre os estudos já realizados no estado de MG, grande parte destes não verificaram a influência do El Niño nos valores de precipitação (Minuzzi et al. 2006; Silva and Reboita 2013).

Segundo estudos (Cunha et al. 2019), a ocorrência de El Niño cooperou com o agravamento da ocorrência de secas nos anos de 2015 e de 2016 na região nordeste, porém, tratando-se da região sudeste, a seca não foi devido ao El Niño, mas devido à restrição hídrica ocorrida devido à influência de um bloqueio anticiclônico que durou

cerca de 45 dias e bloqueou o transporte de umidade oriundo da região Amazônica (Nobre et al. 2016; Marengo et al. 2018). Tal bloqueio, aliado a elevadas temperaturas e a baixos volumes precipitados, incorreu na condição verificada para os anos de 2014 e 2015.

4. CONCLUSÃO

Nesse estudo, os valores de déficit e de excedente hídricos foram determinados por estação do ano ao longo do período de 2009 e 2018. Observou-se que os maiores valores de déficits se encontram na porção norte do estado, com destaque para os anos de 2015 e de 2016, nos quais os valores foram superiores a 500 mm em todas as estações mensuradas no estudo (DJF, MAM, JJA e SON). Os maiores valores de excedente, por sua vez, prevaleceram na porção sul do estado em praticamente todos os anos avaliados.

Em relação aos índices de extremos climáticos e ao SPI calculados, necessários à determinação dos índices de ameaça climática, estes apresentaram valores coerentes com os verificados através dos balanços hídricos. De acordo com os valores de CDD, a maior quantidade de dias consecutivos sem chuvas encontra-se na porção Norte, na qual algumas localidades costumam passar, pelo menos, cem dias sem precipitação; tratando-se do SPI, os valores calculados permitem a verificação de que os maiores eventos de seca se encontram nos anos de 2014 e 2015.

Por fim, apesar de o estado de Minas Gerais apresentar grandes variabilidades climáticas, os índices de ameaça climática de seca e de chuvas intensas calculados demonstram que o estado, de maneira geral, apresenta grau de ameaça baixo ou muito baixo em ambos os casos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AdaptaBrasil (2020) Sobre o AdaptaBrasil. In: MCTI. <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre/metodologia>. Accessed 3 Aug 2021
- Ball P (2000) The hydrological cycle. *Nature*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/news000127-12>
- Beguéría; S, Vicente-Serrano SM (2017) SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. CRAN R Packag version 17
- Bengtsson L (2010) The global atmospheric water cycle. *Environ Res Lett* 5:025202. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025002>
- Britto M, Baptista GM de M, Lima EA de (2019) O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. *Paranoá Cad arquitetura e Urban* 127–146. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n23.2019.11>
- Cunha APMA, Zeri M, Leal KD, et al (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere (Basel)* 10:. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>
- David Pierce (2019) ncd4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. CRAN R Packag version 117
- De Almeida LR, Rosse VP, Viola MR, Vieira-Filho M (2020) Tendências meteorológicas e anomalias de evapotranspiração de referência no período de 2011-2017 para o estado de Minas Gerais. *Rev Bras Climatol* 26:595–613. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.66174>
- de Mello CR, Viola MR (2013) Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Rev Bras Cienc do Solo* 37:37–44. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004>
- de Sousa BM, do Nascimento AER, Gomides SC, et al (2010) Répteis em fragmentos de cerrado e mata atlântica no campo das vertentes, estado de minas gerais, Sudeste do Brasil. *Biota Neotrop* 10:130–138.

<https://doi.org/10.1590/s1676-06032010000200016>

- Eccel E, Cordano E, Toller G (2016) ClimClass: Climate Classification According to Several Indices
- Gao Y, Gao X, Zhang X (2017) The 2 °C Global Temperature Target and the Evolution of the Long-Term Goal of Addressing Climate Change—From the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement. *Engineering* 3:272–278. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.01.022>
- Giorgi F, Im ES, Coppola E, et al (2011) Higher hydroclimatic intensity with global warming. *J Clim* 24:5309–5324. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3979.1>
- Grolemund G, Wickham H (2011) Dates and Times Made Easy with lubridate. *J Stat Softw* 40:1–25
- Guimarães MJM, Lopes I, Oldoni H, Coelho MA (2016) Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. *Rev Ciências Agrar - Amaz J Agric Environ Sci* 59:252–258. <https://doi.org/10.4322/rca.2205>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al (2018) ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Clim Chang Serv Clim Data Store. <https://doi.org/https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al (2019) ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Clim Chang Serv Clim Data Store. <https://doi.org/https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
- IBGE (2020) Estado de Minas Gerais. In: Inst. Bras. Geogr. E ESTATÍSTICA. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>. Accessed 26 Jun 2021
- INPE (2021) Índice de Precipitação Padronizado (SPI). In: SPI - Monit. Secas. <http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>. Accessed 20 Aug 2021
- Leite ME, Leite MRR, Borges MG, Rodrigues HLA (2018) Mapeamento Das Fitofisionomias Do Cerrado No Norte De Minas Gerais. *Rev Geogr - PPGeo - UFJF* 8:. <https://doi.org/10.34019/2236-837x.2018.v8.18060>
- Limberger L (1980) Estudos de teleconexões atmosféricas e possibilidades de avanços na Climatologia Geográfica : conceitos , fontes de dados e técnicas. *Rev Bras Climatol* 19:10–19
- Madakumbura GD, Kim H, Utsumi N, et al (2019) Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5 °C to a 2 °C warmer world. *Sci Rep* 9:1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39936-2>
- Marengo JA, Alves LM, Alvala RCS, et al (2018) Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *An Acad Bras Cienc* 90:1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Portner HO., et al (2018) IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global.* Intergov Panel Clim Chang 1–24
- Micalichen MLM de M, Dias NL da C (2018) Análise comparativa da velocidade do vento e da temperatura do ar, entre dados gerados por reanálises meteorológicas e dados observacionais na região de Minas Gerais. *Ciência e Nat* 40:20. <https://doi.org/10.5902/2179460x30467>
- Minuzzi RB, Sedyama GC, Costa JMN da, Vianello RL (2007) Influência da La Niña na estação chuvosa da região sudeste do Brasil. *Rev Bras Meteorol* 22:345–353. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862007000300008>
- Minuzzi RB, Sedyama GC, Costa JMN da, Vianello RL (2006) Influência Do Fenômeno Climático El Niño No Período Chuvoso. *Geografia* 15:5–19
- Ndehedehe CE, Awange JL, Kuhn M, et al (2017) Climate teleconnections influence on West Africa’s terrestrial water storage. *Hydrol Process* 31:3206–3224. <https://doi.org/10.1002/hyp.11237>
- Nobre CA, Marengo JA, Seluchi ME, et al (2016) Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *J Water Resour Prot* 08:252–262.

<https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>

- Passos MLV, Zambrzycki GC, Pereira RS (2017) Balanço Hídrico Climatológico E Classificação Climática Para O Município De Balsas-Ma. *Sci Agrar* 18:83. <https://doi.org/10.5380/rsa.v18i1.48584>
- Reboita MS, Assireu A, Silva LC da, Rios N (2014) Evidências De Circulação De Brisa Vale-Montanha Na Serra Da Mantiqueira: Cidade De Itajubá – Mg. *Ciência e Nat* 36:. <https://doi.org/10.5902/2179460x12876>
- Reboita MS, Rodrigues M, Silva LF, Alves MA (2015) Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. *Rev Bras Climatol* 17:206–226
- Rew R, Davis G (1990) NetCDF: an interface for scientific data access. *IEEE Comput Graph Appl* 10:76–82. <https://doi.org/10.1109/38.56302>
- Ricardo L (2020) Dinâmica climática e impactos das precipitações na vazão do rio São Francisco no município de Pirapora - Norte de Minas Gerais. *Rev Cerrados* 18:66–82
- Santos VJ dos (2016) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Impactos Pluviais Intensos: O caso da cidade de Ubá/MG. *Rev Bras Climatol* 19:218–238
- Silva ED Da, Reboita MS (2013) Estudo da precipitação no estado de Minas Gerais - MG. *Rev Bras Climatol* 13:120–136
- Silva PN, Escobar GCJ, Reboita MS (2020) Eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Rev Bras Geogr Física* 13:1013. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1013-1023>
- Sousa F de AS de, Macedo MJH, Guedes RV de S, Silva V de PR da (2016) The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). *Ambiência* 12:707–719. <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2016.02.14>
- Stüker E, Schuster CH, Schuster JJ, et al (2016) Comparação Entre Os Dados De Vento Das Reanálises Meteorológicas Era-Interim E Cfsr Com Os Dados Das Estações Automáticas Do Inmet No Rio Grande Do Sul. *Ciência e Nat* 38:284. <https://doi.org/10.5902/2179460x20233>
- Thornthwaite CW, Mather JR (1957) Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Publ Climatol* 10:185–311
- Vinícius M, Marques A, Vinícius C, et al (2017) Diagnóstico da desertificação na região norte de Minas Gerais por meio de técnicas de geoprocessamento. *Bol Geogr* 35:99–116
- Wang W, Chen L (2021) Hydrological Modeling in Water Cycle Processes. *Water* 13:13–15
- Welbert R (2015) Um ano após crise hídrica, cidades traçam “guerra” à falta de água em MG. In: G1. <http://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2015/11/um-ano-apos-crise-hidrica-cidades-tracam-guerra-falta-de-agua-em-mg.html>. Accessed 26 Jun 2021
- Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York
- Wickham H, François R, Henry L, Müller K (2021) *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. CRAN R Packag version 105
- Yang D, Yang Y, Xia J (2021) Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geogr Sustain* 2:115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>
- Yoon JH, Wang SYS, Gillies RR, et al (2015) Increasing water cycle extremes in California and in relation to ENSO cycle under global warming. *Nat Commun* 6:1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9657>