

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”****IMPACTOS DOS LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NO BALANÇO HIDROLÓGICO DE MINAS GERAIS**Gabriel de Freitas Moura<sup>1</sup> (IC), M.Sc Flávia Fernanda Azevedo Fagundes<sup>1</sup>, Dra. Fabrina Bolzan Martins (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI**Palavras-chave:** Temperatura do ar. Precipitação. Deficiência Hídrica. Excedente Hídrico.**Introdução**

Os recursos hídricos são essenciais para o desenvolvimento socioeconômico, a sustentabilidade ambiental e a segurança hídrica global. O Brasil concentra boa parte da água doce superficial do planeta e importantes sistemas como as bacias do Amazonas, São Francisco e Paraná e o Aquífero Guarani. Apesar da abundância as mudanças climáticas, poluição, desmatamento e má distribuição de água ameaçam a segurança hídrica (RUFINO et al., 2025).

O Acordo de Paris busca limitar o aquecimento global a 1,5°C ou abaixo de 2°C, pois cenários de 3°C ou 4°C podem afetar severamente a estabilidade hidrológica (ZÁKHIA et al., 2021). Em Minas Gerais, eventos extremos, como secas prolongadas, chuvas intensas e ondas de calor já comprometem a disponibilidade hídrica e a segurança alimentar e energética (SILVA et al., 2022). Como exemplo, entre outubro e novembro de 2024/2025, chuvas extremas resultaram em óbitos e desalojados, enquanto secas anteciparam decretos de emergência hídrica.

Diante disso, é urgente avaliar os impactos dos limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C) sobre a disponibilidade hídrica em Minas Gerais, usando modelos de circulação geral de alta resolução como o *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) combinados com ferramentas de zoneamento, como o balanço hídrico climatológico (MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024), para subsidiar estratégias de mitigação e adaptação. Dessa forma, o objetivo dessa iniciação científica foi analisar os impactos dos limiares de aquecimento estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5°C e 2°C), assim como limiares de 3°C e 4°C, na disponibilidade hídrica do estado de Minas Gerais.

**Metodologia***Área de estudo*

Minas Gerais (14°13' S e 22°54' S e 39°51' W e 51°02' W), possui cerca de 586.528 km<sup>2</sup>, variando de

áreas baixas, como o Vale do Rio Doce (~200 m), até regiões elevadas, como o Pico da Bandeira (2.892 m). O estado está sob influência do regime de Monção da América do Sul, com verão quente e chuvoso e inverno frio e seco (REBOITA et al., 2018). Quanto ao consumo de água, o setor agropecuário representa 54,3%, o uso urbano-doméstico 20,5% e as atividades industriais e de mineração somam 25,2% (TUCCI et al., 2017).

*Dados climáticos*

Foram utilizados dados diários de temperatura média do ar (Tas, °C) e precipitação acumulada (P, mm dia<sup>-1</sup>) provenientes de 30 modelos de circulação geral (MCGs), distribuídos em dois conjuntos: *Coupled Models Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) e NEX-GDDP-CMIP6. Os dados do CMIP6 abrangem o período histórico de 1850 a 2014, com projeções de 2015 a 2100. Já os dados do NEX-GDDP-CMIP6 abrangem o período histórico de 1950 a 2014, também com projeções até 2100.

Como o NEX-GDDP-CMIP6 não inclui o período pré-industrial, foi definido um período denominado controle referência (PR) entre 1995–2014, em consonância com o adotado no IPCC AR6. Além disso, em ambos os conjuntos de dados foram considerados dois cenários socioeconômicos compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways – SSPs*): SSP2-4.5 – cenário intermediário e o SSP5-8.5 – cenário pessimista.

*Determinação dos limiares de aquecimento global*

Como os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 não cobrem todo o globo e não possuem simulações para o período pré-industrial (1850 - 1900), utilizamos os MCGs do CMIP6 para determinar os anos de aquecimento. Posteriormente, os anos encontrados para cada MCGs do CMIP6 foram diretamente correspondentes com os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6. A determinação dos períodos e padrões de aquecimento (1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C) em relação ao período pré-industrial (1850–1900) seguiu a metodologia descrita por Torres et al. (2021).

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e Evapotranspiração Potencial (ETP)

Para o cálculo do BHC, optou-se por um método com baixa exigência de dados de entrada e capaz de representar adequadamente o armazenamento de água no solo sob diferentes condições climáticas, inclusive com mais de uma estação seca por ano (RIBEIRO et al., 2024). Com isso, utilizou-se a versão do método proposto por Thornthwaite e Mather (1955, 1957), simplificada por Pereira (2005) e posteriormente modificada por Dourado-Neto et al. (2010). As etapas metodológicas encontram-se na Figura 1, enquanto a fundamentação teórica e os procedimentos detalhados estão descritos em Alves et al. (2020) e Dourado-Neto et al. (2010).

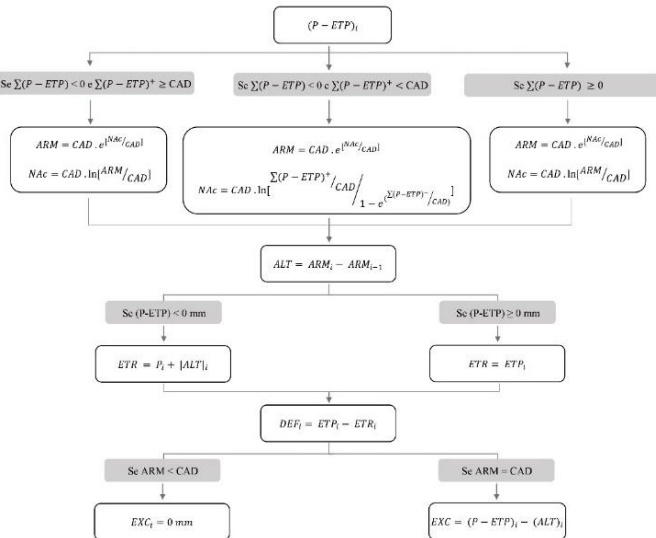


Figura 1 – Passo a passo para calcular o Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite, devido aos bons resultados para o sul de Minas Gerais (SANTOS et al., 2017) e por fornecer diretamente valores climatológicos mensais de ETP, essenciais para o BHC. As equações utilizadas (1 a 6) são:

$$ETP = \begin{cases} 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{as}}{T}\right)^a & \text{se } 0 \leq T_{as} \leq 26,5^\circ \text{ C} \\ -415,85 + 32,24 \cdot T_{as} - 0,43 \cdot T_{as}^2 & \text{se } T_{as} > 26,5^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (1)$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 \cdot T_{med})^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (3)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \arcsin[-1 \cdot (\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta)] \quad (4)$$

$$C_i = \frac{N}{12} \cdot \frac{NDP_i}{30} \quad (5)$$

$$ETP_c = ETP \cdot C_i \quad (6)$$

Resultados e discussão

Os resultados obtidos a partir dos MCG’s indicam que, no cenário SSP2-4.5, os limiares de aquecimento global são atingidos nos anos de 2031 (1,5°C), 2051 (2°C), 2072 (3°C) e 2084 (4°C). Já no cenário SSP5-8.5, a elevação da temperatura ocorre de forma mais acelerada, com os mesmos limiares sendo alcançados em 2028 (1,5°C), 2041 (2°C), 2063 (3°C) e 2072 (4°C). Esse comportamento é consistente com as características de cada cenário: enquanto o SSP5-8.5 projeta aumentos mais intensos e contínuos nas emissões de gases de efeito estufa e na temperatura até o final do século XXI, o SSP2-4.5 apresenta um crescimento até aproximadamente 2050, seguido de estabilização do aquecimento.

Os padrões espaciais anuais de evapotranspiração real (ETr), excedente hídrico (EXC) e deficiência hídrica (DEF) para Minas Gerais, considerando os quatro limiares de aquecimento global no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), bem como as respectivas anomalias em relação ao período de controle (1995–2014), estão apresentados nas Figuras 2 e 3.

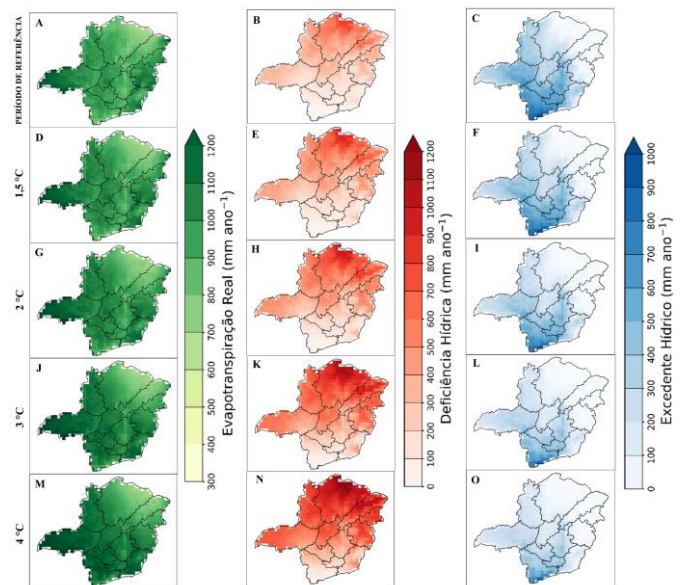


Figura 2 – Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração real (ETr, mm ano<sup>-1</sup>, painéis A, D, G, J e M), deficiência hídrica (DEF, mm ano<sup>-1</sup>, painéis B, E, H, K e N) e excedente hídrico (EXC, mm ano<sup>-1</sup>, painéis

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

C, F, I, L e O) para o período de referência e quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

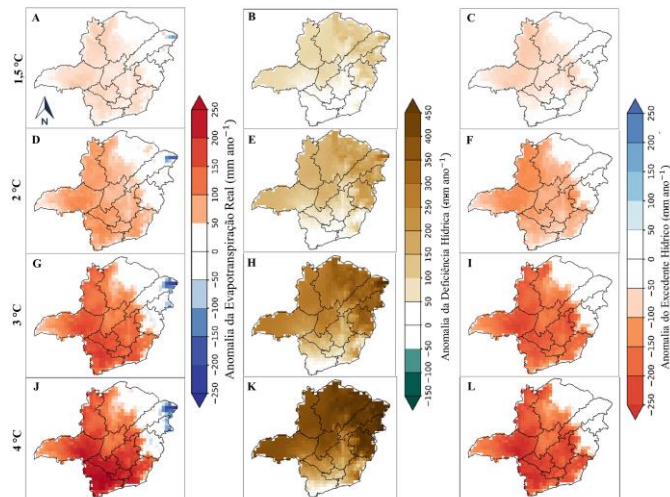


Figura 3 – Anomalias anuais de evapotranspiração real (ETR,  $\text{mm ano}^{-1}$ , painéis A, D, G e J), deficiência hídrica (DEF,  $\text{mm ano}^{-1}$ , painéis B, E, H e K) e excedente hídrico (EXC,  $\text{mm ano}^{-1}$ , painéis C, F, I e L) para Minas Gerais, para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C) para o cenário SSP5-8.5 em relação ao período de referência (PR = 1995-2014).

A Figura 2 evidencia que, no SSP5-8.5, a aproximação e o alcance dos limiares de aquecimento global resultam em intensificação de todas as variáveis analisadas (ETR, DEF e EXC). No estado de Minas Gerais, a principal diferença entre os cenários reside na magnitude e extensão das áreas impactadas, que se amplia à medida que o aquecimento avança.

Sendo assim, no cenário SSP5-8.5, Minas Gerais enfrenta um agravamento extremo da disponibilidade hídrica, com aumento da DEF superior a  $+300 \text{ mm ano}^{-1}$  em grande parte do estado e ultrapassando  $+600 \text{ mm ano}^{-1}$  em áreas do Norte e Noroeste, acompanhado de reduções na precipitação de até  $-150 \text{ mm ano}^{-1}$  e queda nos valores EXC que pode chegar a  $-250 \text{ mm ano}^{-1}$ , intensificando ainda mais os estresse hídrico. As temperaturas médias se elevam até  $+4 \text{ °C}$ , intensificando a ETr em todas as mesorregiões e acelerando as perdas de umidade no solo. Esses efeitos reduzem drasticamente a recarga de reservatórios e aquíferos, aumentando o risco de colapso hídrico em bacias críticas e ampliando a vulnerabilidade socioeconômica, especialmente no Triângulo Mineiro, Noroeste, Norte e Jequitinhonha, onde a pressão sobre os recursos hídricos poderá gerar conflitos entre os setores agrícola, urbano e energético.

As projeções climáticas para Minas Gerais, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, indicam aumento significativo do DEF e redução do EXC, especialmente nos cenários mais severos de aquecimento ( $+3 \text{ °C}$  e  $+4 \text{ °C}$ ). O DEF se intensifica nas estações secas (MAM e JJA), chegando a anomalias superiores a  $600 \text{ mm ano}^{-1}$  no norte, noroeste e centro-oeste, reduzindo a água útil para agricultura, abastecimento, energia e ecossistemas. Regiões como o Triângulo Mineiro podem sofrer impactos produtivos, exigindo irrigação mais eficiente e conservação do solo, enquanto bacias hidrográficas terão redução de vazões mínimas. O EXC, concentrado no verão (DJF) e início da primavera (SON), tende a não ultrapassar  $350 \text{ mm ano}^{-1}$ , diminuindo recarga de reservatórios e aquíferos e agravando estiagens. No centro-sul e sul, a presença moderada de EXC no verão pode aumentar riscos de inundações, sobretudo em áreas com drenagem urbana precária. Essa irregularidade, com verões mais chuvosos e invernos mais secos e quentes, desafia o planejamento hídrico, exigindo sistemas resilientes, gestão por bacia, infraestrutura adaptada a extremos e políticas públicas eficazes para evitar conflitos pelo uso da água, especialmente em regiões vulneráveis. Esse contexto aponta para a necessidade de um novo paradigma na engenharia hídrica, com foco na adaptação às mudanças climáticas, uso racional da água e fortalecimento da segurança hídrica frente à intensificação de secas e chuvas concentradas.

## Conclusões

Os limiares de aquecimento global definidos pelo Acordo de Paris (1,5°C e 2°C) e os mais extremos (3°C e 4°C) exercerão impactos negativos na disponibilidade hídrica sobre Minas Gerais, com: intensificação do estresse hídrico, caracterizada pelo aumento da ETR e do DEF, acompanhada pela redução do EXC. Tais alterações são mais pronunciadas no cenário SSP5-8.5.

O aumento do DEF representa um desafio crítico para a gestão dos recursos hídricos, enquanto a diminuição do EXC compromete a capacidade de recuperação dos sistemas hídricos, exigindo a adoção urgente de medidas adaptativas e estratégias de mitigação. Nesse contexto, as informações obtidas sobre o zoneamento climático e os cenários de aquecimento global constituem ferramentas essenciais para o planejamento e a gestão das áreas mais vulneráveis, subsidiando a formulação de políticas públicas eficazes para reduzir os impactos e fortalecer a resiliência regional.

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”****Agradecimentos**

Ao Programa Institucional de Bolsas FAPEMIG, que, por meio da concessão da bolsa, forneceu os recursos necessários para a execução do projeto.

**Referências**

ALVES, A. M. M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.26, p.712-732, 2020.

AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F.; LINDEMANN, D. S.; RODRIGUES, J. M.; FERREIRA, G. R. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, n. 2, p. e20190388, 2020.

DOURADO-NETO, D.; LIER, Q.de.J.V.; METSELAAR, K. et al. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Scientia Agricola*, v. 67, n. 1, p. 87-95, 2010.

MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on Eucalyptus plantations in South America. *Science of The Total Environment*, v.825, p.153820, 2022.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. Cenários de Mudanças Climáticas Projetados para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 33, p. 110-128, 2018.

RIBEIRO, A. F.; MARTINS, F. B.; SANTOS, D. F.; TORRES, R. R.; FAGUNDES, F. F. A. Suitable areas for temperate fruit trees in a Brazilian hotspot area: changes driven by new IPCC scenarios. *European Journal of Agronomy*, v.155, p.127110, 2024.

RUFINO, P. R., GÜCKER, B., VOLK, M., STRAUCH, M., CARDOZO, F. da S., BOËCHAT, I. G., FARAMARZI, M., PEREIRA, G. Modeling the Nexus of Climate Change and Deforestation: Implications for the Blue Water Resources of the Jari River, Amazonia. *Water*, v. 17(5), p. 660, 2025.

SANTOS, D.F.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, p. 77-82, 2017.

SILVA, A. C.; BERG, E. V. D.; HIGUCHI, P.; NUNES, M. H. Dinâmica de uma comunidade arbórea após enchente em fragmentos florestais no sul de Minas Gerais. *Árvore*, v.35, p.381-389, 2011.

SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C. Projeções de

secas severas no clima futuro no Sudeste do Brasil: um estudo de caso no sul do estado de Minas Gerais, Brasil. *Theor Appl Climatol*, v. 148, p. 1289-1302, 2022.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 1957.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The moisture balance. *Publications in climatology*, v. 8, 1955.

TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. Projected impacts of 1.5°C and 2°C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. *International Journal of Climatology*, v.42, n.3, p.1597-1611, 2021.

TUCCI, C. E. M.; CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 14, e. 12, 2017.

ZÁKHIA, E. M. S. et al.. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 4, p. 667–681, out. 2021.