

## IMPACTOS DAS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO EM MINAS GERAIS

Atila de Oliveira<sup>1</sup> (IC), Fabrina Bolzan Martins (PQ)<sup>1</sup>, Rafael Gonçalves Xavier (PG)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** MZA-FAO, mudanças climáticas, NEX-GDDP-CMIP6

### Introdução

O eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é um dos gêneros florestais mais importantes economicamente, cultivado em mais de 100 países (Noletto-Dias et al., 2023). O Brasil lidera a produção global, com Minas Gerais sendo o estado de maior produção. No entanto, fatores como variação climática, temperaturas acima dos limites adequados e deficiência hídrica impactam negativamente a produtividade do eucalipto. As mudanças climáticas, com projeções de aumentos de temperatura e variações na precipitação, podem agravar esses impactos, causando estresse biótico e abiótico nas plantas, o que compromete a produtividade e altera as áreas adequadas para cultivo (Tavares et al., 2018; Noletto-Dias et al., 2023).

Para entender melhor o impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto, uma abordagem eficaz é o uso de Modelos Climáticos de Circulação Geral (MCGs), como os disponíveis na *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) acoplados a modelos de produtividade (Elli et al., 2020b). Nesse sentido, o Modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO), já calibrado para o Brasil por Freitas et al., (2020), se destaca por utilizar variáveis de entrada de fácil acesso nos MCGs, além de ser de código aberto, permitindo projeções em larga escala (Freitas et al., 2020). No entanto, estudos focados no estado de Minas Gerais ainda são escassos, levantando três questões centrais: (i) O MZA-FAO é eficaz na projeção da produtividade do eucalipto em Minas Gerais? (ii) Como as mudanças climáticas afetarão essa produtividade ao longo do século XXI? (iii) Quais áreas serão mais impactadas?

### Metodologia

#### Área de estudo

O presente estudo foca no estado de Minas Gerais, situado na região sudeste do Brasil. Isso se deve a sua importante participação na produção florestal do país (2.200.351 ha<sup>-1</sup>).

### Dados climáticos e edáficos

Foram utilizados dados climáticos diários de temperatura mínima (Tmin, °C), temperatura média (Tmed, °C), temperatura máxima (Tmax, °C), radiação solar global (Rs, s, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e precipitação (P, mm dia<sup>-1</sup>), que são as variáveis de entrada no MZA-FAO. A Tmed foi calculada como a média aritmética entre Tmax e Tmin. Esses dados foram simulados para o clima presente (CP, 1989-2014) e projetados para dois futuros: futuro próximo (FP, 2035-2060) e futuro distante (FD, 2075-2100), sob os cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Os dados climáticos são oriundos de 16 MCGs disponibilizados pelo projeto NEX-GDDP-CMIP6. Esses modelos foram selecionados pela qualidade na simulação dos padrões climáticos regionais e a disponibilidade de variáveis meteorológicas completas (Dias et al., 2024;). Para validar os dados simulados no CP, os resultados foram comparados com dados de Xavier et al. (2016), que são derivados de interpolações de dados observados em estações meteorológicas (Fagundes et al., 2021; Monteiro et al., 2021) e que possuem alta resolução espacial (0,25° x 0,25°), a mesma dos modelos do NEX-GDDP-CMIP6 e são reconhecidos pela precisão espacial e temporal. Foram usadas as estatísticas do coeficiente de correlação de Pearson (r) e viés médio (VM) para essa validação.

A capacidade de retenção de água no solo (CRAS) foi determinada com base em dados de textura do solo disponibilizados pelo sistema GLDAS-2. Para simplificação das análises, os tipos de solo foram agrupados em três categorias principais: solos arenosos, solos francos e solos argilosos, com valores de CRAS variando de 0,60 mm cm<sup>-1</sup> a 1,52 mm cm<sup>-1</sup>, conforme a classificação proposta por Florêncio et al. (2022).

#### Descrição do modelo MZA-FAO

O modelo MZA-FAO, desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979), foi utilizado para calcular a produtividade potencial acumulada (PPac) e produtividade atingível acumulada (PAac) do eucalipto, considerando variáveis climáticas diárias. As etapas do

cálculo podem ser consultadas na figura 1, e todas as equações estão disponíveis em Freitas et al., 2020.

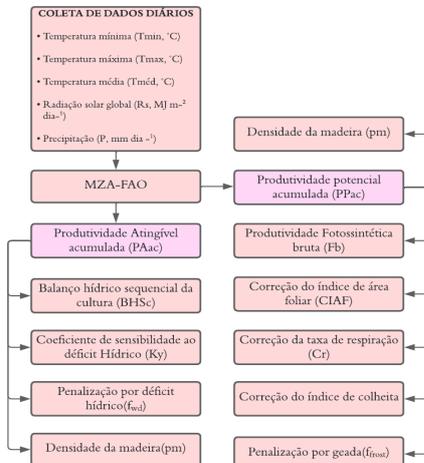


Figura 1 – Etapas do cálculo da Produtividade potencial e atingível do eucalipto com o MZA-FAO calibrado.

### Balanço hídrico e evapotranspiração

O balanço hídrico foi determinado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), considerando a capacidade de água disponível (CAD) no solo e a evapotranspiração da cultura (ETc), que é calculada a partir da evapotranspiração de referência (ETo) multiplicada pelo coeficiente de cultura (Kc). A ETo foi estimada pelo método de Abtew (1996) (equação 1):

$$ETo = \frac{0,01786.Rs.Tmax}{\lambda} \quad (1)$$

Em que: Rs = radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), Tmax = temperatura máxima do ar (°C), λ = calor latente de vaporização (2,4418 MJ kg<sup>-1</sup>).

### Simulação da quebra de produtividade

A quebra de produtividade (QP) foi calculada para os períodos CP, FP e FD. A QP reflete os impactos das condições climáticas desfavoráveis, como geada e déficit hídrico intenso sobre a produtividade final do eucalipto.

$$QP = \left[ 1 - \frac{PAac}{PPac} \right] \times 100 \quad (2)$$

Em que: QP = quebra de produtividade (%), PAac = produtividade atingível acumulada (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), PPac = produtividade potencial acumulada (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

### Projeções de variáveis meteorológicas

As variáveis Tmin, Tmed, Tmax, Rs, P, evapotranspiração da cultura (ETc) e deficiência hídrica

(DEF) foram simuladas para o período CP e projetadas para os períodos FP e FD, baseando-se nos dois SSPs. Essas variáveis foram utilizadas para ajustar a produtividade simulada, incorporando os fatores climáticos projetados e assegurando a consistência das projeções nos cenários futuros.

## Resultados e discussão

### Validação dos modelos climáticos para o clima presente

Para o período de 1989 a 2014, foram avaliadas as variáveis climáticas Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P, considerando o r e o VM especializado para cada variável. No geral, os modelos apresentaram um bom desempenho na representação dos padrões mensais, com altas correlações para Tmin e Tmed (r > 0,90), com destaque para os modelos ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2 e NorESM2-LM. Entretanto, a variável Rs apresentou a menor performance (r > 0,85), principalmente nos modelos MPI-ESM1-2-LR e EC-Earth3-Veg-LR.

Foram identificados vieses de até 3°C para a Tmin, Tmed e Tmax, atribuídos à dificuldade dos modelos em regiões de topografia complexa (Almazroui et al., 2021). Ainda assim, os valores obtidos pelo ensemble (EM) dos MCGs mostraram resultados satisfatórios.

### Projeções para variáveis que impactam a produtividade do eucalipto

As projeções para a Tmin mostraram um aumento entre 1,0°C e 4,5°C no cenário SSP3-7.0 e entre 3,0°C e 5,5°C no SSP5-8.5 (ambos para o FD). Para a Tmed, o aumento projetado foi de 1,5°C a 4,5°C no SSP3-7.0 (FP e FD) e de 2,0°C a 5,5°C no SSP5-8.5 (FD). A Tmax também sofre uma variação, com aumentos entre 2,5°C e 5,0°C no SSP3-7.0, e de 3,5°C a 6,0°C no SSP5-8.5, com destaque para o triângulo mineiro.

A Rs apresentou variações menores, com aumento de 0,1 a 0,5 MJ/m<sup>2</sup> no SSP5-8.5 (FD) e estabilidade ou pequenas diminuições de até -0,2 MJ/m<sup>2</sup> no SSP3-7.0 (FD). A P deve diminuir em até -150 mm ano<sup>-1</sup> no SSP5-8.5 para o FD.

A DEF deverá aumentar entre 100 mm ano<sup>-1</sup> e 200 mm ano<sup>-1</sup> no SSP3-7.0 (FD) e entre 150 mm ano<sup>-1</sup> e 300 mm ano<sup>-1</sup> no SSP5-8.5 (FD). A evapotranspiração da cultura (ETc) deve apresentar aumentos de 40 a 100 mm ano<sup>-1</sup> no SSP3-7.0 (FP) e de 60 a 180 mm ano<sup>-1</sup> no SSP5-8.5 (FD), indicando maiores demandas hídricas no futuro.

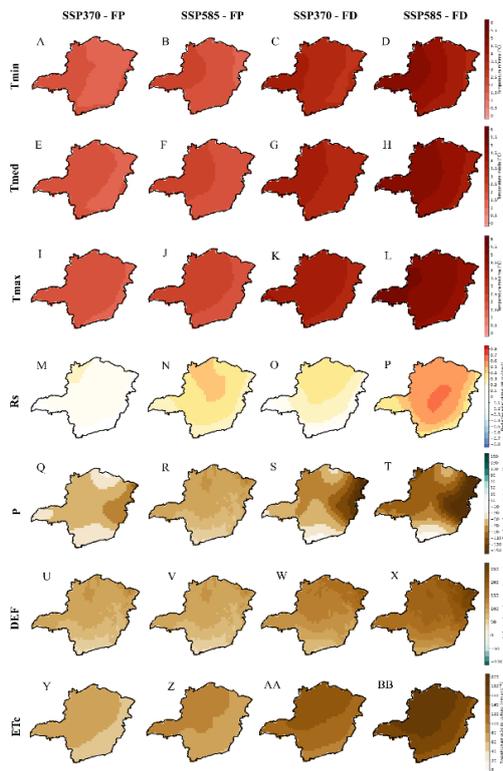


Figura 2 – Projeções espaciais das variáveis climáticas em Minas Gerais sob os cenários de emissões SSP3-7.0 e SSP5-8.5 para o FP e FD.

**Projeções de Produtividade e Quebra de Produtividade**

A Figura 3 apresenta a PPac do eucalipto para o estado de Minas Gerais. No CP, as áreas com menor produtividade atingem  $650 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , enquanto algumas das áreas de maior produtividade alcançam até  $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Para o FP, observa-se uma expansão das áreas de alta produtividade ( $600\text{-}800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) em ambos os cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

A tendência de aumento é mantida no futuro distante (FD), onde as áreas de alta produtividade potencial são ainda mais predominantes em ambos os cenários, com grande parte do estado com produtividades na faixa entre  $700$  a  $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

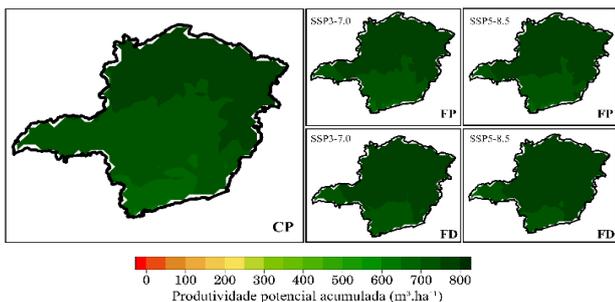


Figura 3 – PPac do eucalipto simulada no CP (1989-

2014) e projetada no FP (2035-2060) e FD (2075-2100), considerando dois cenários socioeconômicos (SSP3-7.0 e SSP5-8.5)

A Figura 4 apresenta as projeções da PAac para Minas Gerais. No CP, há uma ampla variação na PAac, com as maiores produtividades concentradas nas regiões sul e sudoeste, onde os valores ultrapassam  $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Em contraste, as regiões norte e nordeste apresentam as menores produtividades, com valores inferiores a  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . No cenário SSP3-7.0 para o FP, há uma redução na PAac, especialmente nas regiões norte e nordeste, onde a PA varia entre  $100$  e  $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Essa tendência de redução se intensifica no FD, com algumas áreas do norte e nordeste registrando valores abaixo de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

No cenário SSP5-8.5 para o FP, a PAac exibe padrões semelhantes aos do SSP3-7.0, mas com uma redução mais acentuada, especialmente no triângulo mineiro, onde a produtividade varia entre  $200$  e  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Para o FD, projeta-se uma diminuição ainda maior na PAac em todo o estado, com regiões anteriormente produtivas caindo abaixo de  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , e áreas de menor produtividade se expandindo para a porção central e sul, com algumas localidades atingindo valores abaixo de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

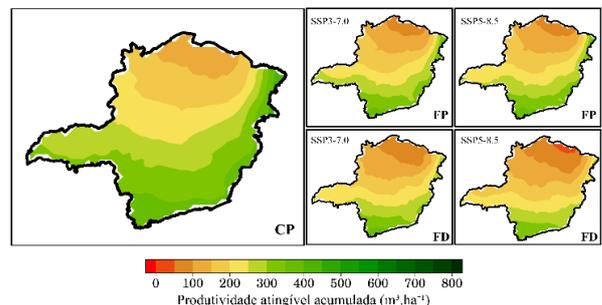


Figura 4 – PAac do eucalipto simulada no CP (1989-2014) e projetada no FP (2035-2060) e FD (2075-2100) considerando dois cenários socioeconômicos (SSP3-7.0 e SSP5-8.5)

A Figura 5 apresenta a simulação e projeções de QP do eucalipto para Minas Gerais. No CP, a QP varia de 50% a 90%, com as áreas mais afetadas concentradas no norte e nordeste do estado, onde a quebra de produtividade ultrapassa 85%. No FP, em ambos os cenários, a QP continua alta na maior parte do estado, mas intensifica-se nas regiões norte e nordeste, especialmente no cenário SSP5-8.5.

No FD, a QP do eucalipto apresenta valores ainda mais elevados, com a região do triângulo mineiro exibindo uma QP entre 65% e 75% no cenário SSP3-7.0. A porção norte do estado apresenta uma QP entre 70% e 90%, com algumas áreas superando 95%. No SSP5-8.5, o cenário é ainda mais severo, com extensas áreas do estado apresentando uma QP superior a 90%, chegando a valores próximos de 100% em determinadas regiões,

como o extremo norte e partes do leste do estado. Esses resultados evidenciam a forte influência do aumento das temperaturas, da deficiência hídrica e da redução da precipitação, comprometendo a viabilidade econômica da produção de eucalipto em áreas vulneráveis.

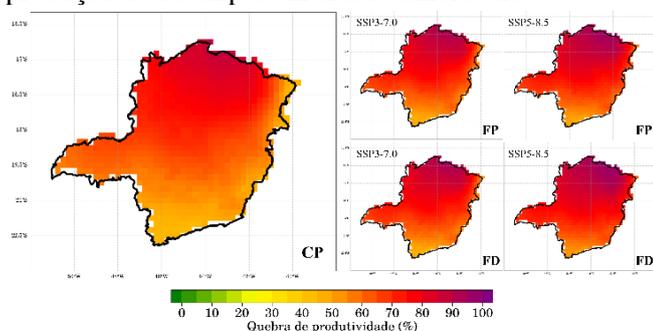


Figura 3 – QP (%) do eucalipto simulada no CP (1989-2014) e projetada no FP (2035-2060) e FD (2075-2100) considerando dois cenários socioeconômicos (SSP3-7.0 e SSP5-8.5)

Essas projeções têm várias implicações para a gestão agrícola e a formulação de políticas públicas. A adaptação das práticas de manejo, como a escolha de genótipos mais resistentes e o uso eficiente de recursos hídricos, será crucial para mitigar os impactos das mudanças climáticas na produção de eucalipto.

### Conclusões

No século XXI, projeta-se um aumento acentuado nas temperaturas, especialmente no cenário SSP5-8.5, com variações de Tmed entre 2,0 e 5,5°C, Tmin entre 3,0 e 5,5°C, e Tmax entre 3,5 e 6,0°C.

Apesar da expansão das áreas de alta PPac de eucalipto nas regiões central e norte, tanto no FP quanto no FD, a PAac tende a diminuir em todo o estado. No FD e no cenário SSP5-8.5, a norte e nordeste do estado terão produtividades abaixo de 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, enquanto no SSP3-7.0, a produtividade nessas regiões irá cair para menos de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, evidenciando a vulnerabilidade da silvicultura.

Projeções de QP indicam que as porções norte e nordeste poderão sofrer reduções de PPac superiores a 90% no cenário SSP5-8.5 (FD).

### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa ao 1º autor (processo ID 100171)

### Referências

ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling

for three wetland systems in South Florida. **Water Resources Bulletin**, v.32, n.3, p.465-473, 1996.

DIAS, C.G.; MARTINS, F.B.; MARTINS, M.A. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of The Total Environment**, p. 167753, 2024.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: a process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v. 114, p. 106325, 2020b.

FLORENCIO, G.W.L.; MARTINS, F.B.; FAGUNDES, F.F.A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115538, 2022.

FREITAS, C.H; MARTINS, F.B.; ABREU, M.C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 283-292, 2017.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood Eucalyptus productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 139, p. 759-776, 2020.

NOLETO-DIAS, C.; PICOLI, E.A.D.T.; PORZEL, A.; WESSJOHANN, L.A.; TAVARES, J.F.; FARAG, M.A. Metabolomics characterizes early metabolic changes and markers of tolerant Eucalyptus ssp. clones against drought stress. **Phytochemistry**, p. 113715, 2023.

TAVARES, P.S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S.C.; SILVA, A.J.P.; LYRA, A.A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 873-883, 2018.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, R.J. The water Balance. New Jersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 1955, 104 p. (Publication in Climatology).

XAVIER, A.C.; KING, C. W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.