

## ANÁLISE DOS POSSÍVEIS IMPACTOS DAS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO EM ITAJUBÁ - MINAS GERAIS

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

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

**Palavras-chave:** Deficiência hídrica. Mudanças Climáticas. MZA-FAO. Temperatura do ar.

### Introdução

O eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é o gênero florestal economicamente mais importante do mundo. Seu cultivo abrange aproximadamente 25 milhões de hectares (ELLI et al., 2020a; FLORÊNCIO et al., 2022). Características como sua alta adaptabilidade e produtividade, rápido crescimento, curta rotação e colheita e múltiplos usos (ELLI et al., 2020a; ELLI et al., 2020b) têm impulsionado seu plantio em mais de 100 países.

O Brasil é líder mundial em produtividade de eucalipto, com valor médio de  $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IBÁ, 2022). Nesse sentido, Minas Gerais destaca-se como o maior produtor de eucalipto no país, com ~ 30% da produção nacional (IBÁ, 2022). Como a produtividade do eucalipto é influenciada pela variabilidade climática, é fundamental avaliar o impacto das projeções climáticas na produtividade. Uma das formas eficazes é acoplar as saídas dos modelos climáticos em modelos de produtividade (ELLI et al., 2020a).

Dentre os modelos climáticos, aqueles integrantes do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP), que derivam das saídas do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) com *downscaling* estatístico (THRASHER et al., 2022) e resolução mais refinada ( $0,25^\circ$  em latitude/longitude) são excelente opção para estudos em escala regional. Já o modelo de produtividade da Zona Agroecológica (MZA-FAO) da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (do acrônimo em inglês, FAO) possui vantagens comparado aos demais. Além disso, já foi calibrado para o Brasil para diferentes genótipos e híbridos de eucalipto (FREITAS et al., 2020). Apesar da grande importância do eucalipto no setor florestal, estudos sobre essa temática, com foco local, como em Itajubá, são inexistentes. Dessa forma, o objetivo dessa iniciação científica foi analisar as mudanças na produtividade potencial (PP) e na produtividade real (PR) do eucalipto projetadas ao longo do século XXI para Itajubá.

### Metodologia

A área de estudo compreende a cidade de Itajubá, localizada no sul de Minas Gerais, entre os paralelos S  $22^\circ37'0''$  e  $22^\circ17'0''$ , e os meridianos O  $45^\circ36'0''$  e  $45^\circ12'0''$  (Figura 1).

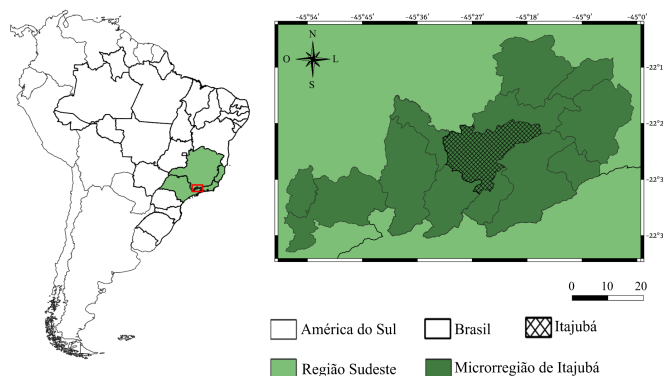


Figura 1 - Localização da cidade de Itajubá

Para simular e projetar a produtividade do eucalipto, foram utilizados dados diários de temperatura mínima ( $T_{min}$ ,  $^\circ\text{C}$ ), temperatura média ( $T_{med}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) e temperatura máxima ( $T_{max}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) do ar, radiação solar global ( $R_s$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e precipitação ( $P$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ), simulados para o clima presente (CP, 1989-2014), e projetados para dois períodos futuros - futuro próximo (FP, 2035-2060) e futuro distante (FD, 2075-2100). Todos os dados foram obtidos de 16 MCGs oriundos do NEX-GDDP, fornecido pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizado pelo portal *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) (disponível em: <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html#NEX-GDDP-CMIP6/>). Os 16 MCGs utilizados foram: ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, CanESM5, CMCC-ESM2, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM e NorESM2-MM. Neste estudo, foram utilizados os cenários SSP3-7.0 e o SSP5-8.5. A análise da PP e PR para o CP, FP e FD foi realizada para cada

modelo e, posteriormente, para o *ensemble mean* (EM) dos 16 MCGs. Previamente, os dados de Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P dos MCGs foram validados para o CP (1989-2014) pela comparação com os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) (disponível em: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>). Para essa etapa, as estatísticas usadas foram o coeficiente de correlação de Pearson (r, Equação 1) e o viés médio (VM, Equação 2):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2\right)}} \quad (1)$$

$$VM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (2)$$

Em que: Si= valores simulados das variáveis (Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P) para os 16 MCGs, Oi= valores observados das variáveis (Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P) fornecidos por Xavier et al. (2016), ambos para o CP,  $\bar{S}$ = valores médios do conjunto de dados simulados,  $\bar{O}$ = valores médios do conjunto de dados observados, n = número de dados.

A capacidade de água disponível (CAD) foi obtida pelo produto entre o comprimento efetivo do sistema radicular (Zr, cm) do eucalipto e a capacidade de retenção de água do solo (CRAS, mm cm<sup>-1</sup>). O Zr do eucalipto possui valores variáveis ao longo da rotação, a qual possui 84 meses (7 anos). Com isso, os valores de Zr foram determinados de acordo com as orientações descritas por Freitas et al. (2020). Para Itajubá, o valor de CRAS utilizado foi de 1,52 mm cm<sup>-1</sup> (solos predominantemente argilosos com alta CRAS).

Para estimar a PR, previamente deve-se obter a deficiência hídrica (DEF) por meio da evapotranspiração da cultura (ETc) e da evapotranspiração real (ETr), as quais derivam do balanço hídrico sequencial da cultura (BHSc). O BHSc foi calculado pelo método descrito por Thornthwaite e Mather (1955), e a ETo foi estimada utilizando o método de Abtew (1996) (Equação 3):

$$ETo = \frac{0,01786.Rs.Tmax}{\lambda} \quad (3)$$

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

O MZA-FAO, desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1994), é segmentado em duas etapas: estimativa da PP e PR, dada pela penalização da PP

devido à deficiência hídrica. As etapas de cálculo podem ser consultadas na figura 2 e em Freitas et al. (2020).

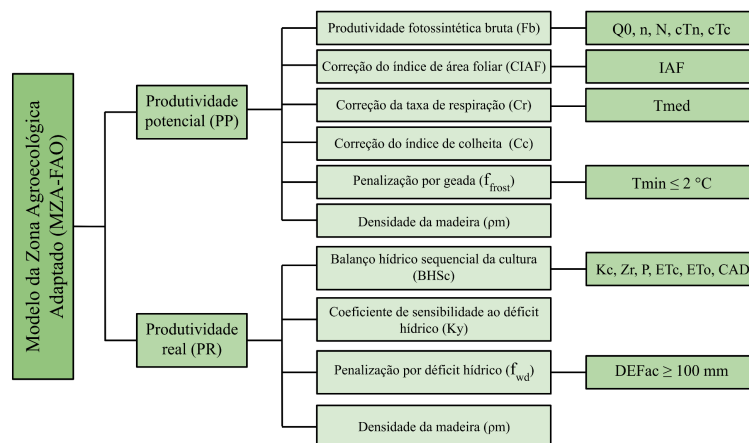


Figura 2 - Etapas de cálculo da produtividade potencial e real com o MZA-FAO adaptado. Adaptado de Freitas et al. (2020).

Também foi simulado e projetado a quebra de produtividade (QP) do eucalipto (Equação 3), que se refere à redução da produtividade da cultura do eucalipto. A QP pode ser originada por diferentes fatores, sendo a DEF, atrelada a condições climáticas desfavoráveis, a principal causa da lacuna de produtividade do eucalipto no Brasil (ELLI et al., 2020b).

$$QP = \left[1 - \frac{PRac}{PPac}\right] \cdot 100 \quad (3)$$

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

Os impactos das projeções climáticas na produtividade do eucalipto foram analisados em duas etapas: i) análise das mudanças (futuro menos clima presente) no padrão das variáveis Tmed (°C), Rs (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), P (mm ano<sup>-1</sup>), e DEF (mm ano<sup>-1</sup>), e ii) alterações na PP, PR e QP. Na etapa i foram obtidos os valores médios por meio do EM de todos os MCGs, para minimizar possíveis incertezas geradas individualmente por cada MCG, conforme Elli et al. (2020a) e Florêncio et al. (2022). Na etapa ii as simulações e projeções da produtividade foram realizadas individualmente para cada MCG e, posteriormente, obtido a média (*ensemble mean*) da produtividade dos 16 MCGs.

## Resultados e discussão

Os 16 MCGs conseguiram representar o padrão

mensual das variáveis utilizadas. Para Tmin, Tmed e Tmax foram encontradas altas correlações ( $r > 0,90$ ) e baixos valores de VM ( $VM < 0,5$  °C), com destaque para os modelos ACCESS-ESM1-5, EC-Earth3-Veg-LR, MPI-ESM1-2-HR ( $r \sim 0,99$  e  $VM \sim 0,2$  °C). No entanto, as piores performances foram observadas nos modelos INM-CM4-8, NorESM2-MM para Rs ( $VM \sim 0,3$  MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e P ( $VM \sim 20$  mm mês<sup>-1</sup>). Embora haja melhor representação do padrão mensal de Tmin, Tmed e Tmax, e maior variabilidade para Rs e P, os valores obtidos com o EM dos MCGs se aproximaram do conjunto de dados observados.

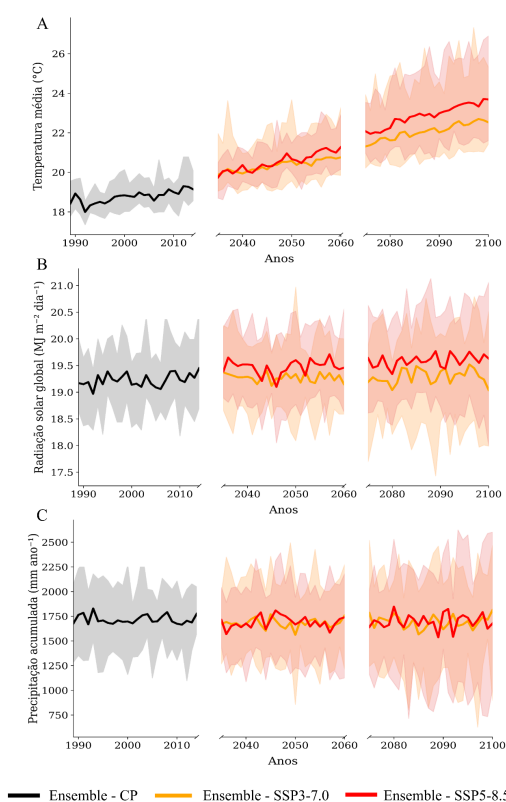


Figura 3 - Variação temporal simulada para o clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro próximo (FP, 2035-2060) e futuro distante (FD, 2075-2100) obtida pelos 16 MCGs do NEX-GDDP para Itajubá em dois cenários socioeconômicos (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). As áreas (cinza, laranja e vermelho) representam a média anual dos dados de cada MCG e as linhas em negrito (preto, laranja e vermelho) representam o *ensemble mean* dos MCGs. A = temperatura média do ar, B = radiação solar global, C = precipitação

Para Tmed (Figura 3A) são projetados aumentos de  $\sim +1,2$  °C no FP do SSP3-7.0 e  $\sim +4$  °C no FD do SSP5-8.5. Esse resultado é semelhante às projeções encontradas para Itajubá usando outros modelos e CMIP.

Com relação à Rs (Figura 3B), observa-se um comportamento consistente e pouco variável ao longo do século XXI. No cenário SSP5-8.5, tanto no FP quanto no FD, nota-se um maior aumento ( $\sim +0,5$  MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) em comparação com o CP. Por fim, ao analisar a variação temporal da P (Figura 3C) observa-se uma sutil redução no EM de  $\sim -50$  mm ano<sup>-1</sup> no FP e SSP3-7.0 e  $\sim -70$  mm ano<sup>-1</sup> no FD e SSP5-8.5. Com relação a DEF, as projeções indicam que no FP do SSP3-7.0 (SSP5-8.5) a DEF em Itajubá sofreu um aumento de 33,8 mm ano<sup>-1</sup> (36,3 mm ano<sup>-1</sup>), já no FD do SSP3-7.0 (SSP5-8.5) a DEF se intensifica, com um ligeiro aumento de 57,7 mm ano<sup>-1</sup> (85,7 mm ano<sup>-1</sup>) com relação ao CP.

Considerando a PPa (Figura 4) nota-se que no CP (Figura 4A) os valores estão concentrados na faixa entre 707 e 715 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Em geral, as projeções não indicaram mudanças expressivas no comportamento da PPa no FP comparado com o CP. No SSP3-7.0 (SSP5-8.5) os valores de PPa permanecem entre 676 e 721 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

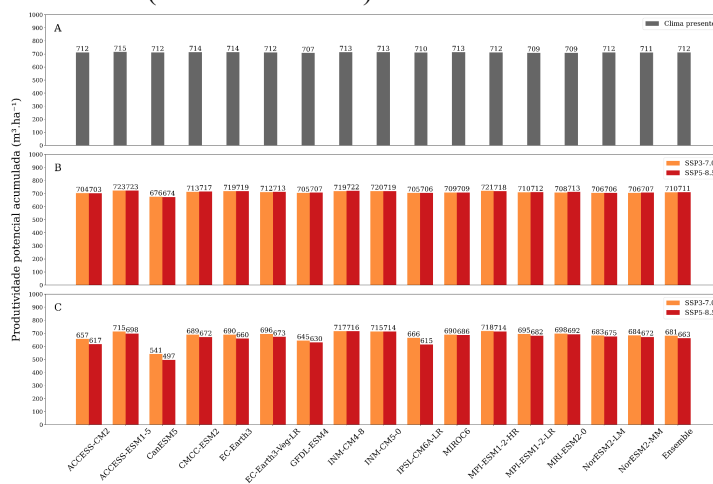


Figura 4 - Variação modelo a modelo e *ensemble mean* da produtividade potencial acumulada simulada no clima presente (CP, 1989-2014) (A) e projetada no futuro próximo (FP, 2035-2060) (B) e distante (FD, 2075-2100) (C) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

A sutil redução na PPa no FP decorre das mudanças menos pronunciadas de Tmed (Figura 3A) e Rs (Figura 3B) projetadas. No FD, as reduções são mais evidentes na PPa. No SSP3-7.0 (SSP5-8.5) os valores concentram-se na faixa entre 541 e 718 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (497 e 716 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

A PRa (Figura 5) apresentou valores menores e mais variáveis em comparação com a PPa. No CP os valores são inferiores a 300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Com relação ao FP observa-se um ligeiro aumento na PRa comparado com

o CP, independente do SSP analisado. Nesse período os valores de PRa no SSP3-7.0 (SSP5-8.5) permanecem na faixa entre 178 e 351 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (169 e 347 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). No FD), a PRa atingiu valores superiores aos encontrados no CP, indicando um aumento em relação ao FP. No SSP3-7.0 (SSP5-8.5) foram projetados valores entre 170 e 402 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (133 e 351 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

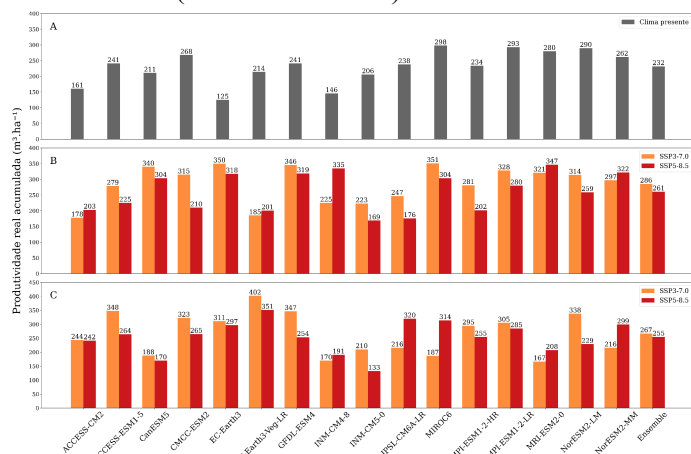


Figura 5 - Variação modelo a modelo e ensemble mean da produtividade real acumulada simulada no clima presente (CP, 1989-2014) (A) e projetada no futuro próximo (FP, 2035-2060) (B) e distante (FD, 2075-2100) (C) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

Projeções de aumento ameno da Tmed e Rs, associadas a pequenas variações da P (Figura 3), ocasionam uma maior disponibilidade de água no solo, contribuindo para um aumento na PRa (Figura 5).

No CP, a QP do eucalipto em Itajubá é de 44,3%. Já no FP, as projeções de QP não apresentam grandes diferenças em comparação com o CP, havendo apenas um aumento de 4% no cenário SSP3-7.0 e 3,2% no SSP5-8.5. Entretanto, no FD, a QP apresenta um aumento mais pronunciado, com um acréscimo de 5,1% no SSP3-7.0 e 7,8% no SSP5-8.5.

## Conclusões

Os achados deste estudo indicam que haverá aumentos na temperatura do ar (mínima, média e máxima) (entre ~1,2 °C e ~4 °C), radiação solar global (até +0,5 MJ m<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>) e redução na precipitação (até -70 mm ano<sup>-1</sup>). Além disso, a quebra de produtividade na cidade pode chegar a 52,1% (SSP5-8.5). Dessa forma, para tornar a produção de eucalipto viável na cidade são necessárias medidas adaptativas, como a seleção de genótipos tolerantes a temperaturas elevadas e práticas de manejo do solo.

## Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Bolsas PIBIC/CNPq pela concessão da bolsa (ID 126759/2022-7) e por fornecer investimento à pesquisa.

## 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.

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.; BENDER F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020a.

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.

FLORÊNCIO, 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.; 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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2022.

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

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA global daily downscaled projections, CMIP6. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 262, 2022.

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.