

GISELE CAROLINA ALMEIDA

**MODELAGEM DE DADOS EM PAINEL DINÂMICO PARA ESTIMATIVA DOS
EFEITOS CLIMÁTICOS E ECONÔMICOS NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-
AÇÚCAR NO TRIÂNGULO MINEIRO - MINAS GERAIS, BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro

Coorientador: José Francisco de O. Júnior

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447m
2022

Almeida, Gisele Carolina, 1994-
Modelagem de dados em painel dinâmico para estimativa dos efeitos climáticos e econômicos na produtividade de cana de açúcar no Triângulo Mineiro - Minas Gerais, Brasil / Gisele Carolina Almeida. – Viçosa, MG, 2022.

1 tese eletrônica (97 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.221>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Climatologia agrícola. 2. Cana-de-açúcar - Produtividade.
3. Modelos econométricos. I. Imbuzeiro, Hewlley Maria Acioli,
1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 630.2516

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

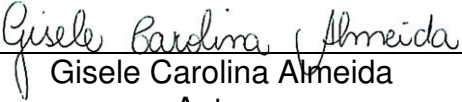
GISELE CAROLINA ALMEIDA

MODELAGEM DE DADOS EM PAINEL DINÂMICO PARA ESTIMATIVA DOS EFEITOS CLIMÁTICOS E ECONÔMICOS NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NO TRIÂNGULO MINEIRO - MINAS GERAIS, BRASIL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de agosto de 2022.

Assentimento:


Gisele Carolina Almeida
Autora

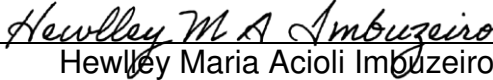
Documento assinado digitalmente



GISELE CAROLINA ALMEIDA

Data: 01/09/2023 15:34:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro
Orientadora

Documento assinado digitalmente



HEWLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

Data: 01/08/2023 06:44:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, por estar sempre presente na minha vida e por tudo o que alcancei até hoje, pois a força que me faz lutar e persistir provém apenas do TEU poder, meu Pai Celestial.

À toda minha família, em especial aos meus pais e minha tia Fernanda, pelo todo amor, carinho, paciência, valiosos conselhos e por sempre acreditarem no meu potencial. Amo vocês.

Ao Artur por tolerar meus humores e, principalmente, por me entender. Amo você!

Aos meus amigos, quer estejam longe ou perto, quer sejam recentes ou antigos, muitos achegados ou mais distantes, agradeço de coração todas as palavras de incentivo, todos os momentos sejam eles alegres ou tristes. Em especial, Bruna, Gaby, Gabriel, Ícaro, Pedro, Sandro, Thaís, aí de mim sem vocês. Amo vocês.

À Universidade Federal de Viçosa, aos professores e colegas do programa de Pós-Graduação de Meteorologia Aplicada (DEA/UFV), em especial à Graça, Prof. Marcos e Prof. Gabrielle pelas conversas e conselhos.

Ao Grupo de Pesquisa Micromet- UFV, em especial a minha orientadora Hewlley, pela confiança, apoio e acolhimento.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Não poderia de deixar de mencionar minha avó Dairce (*in memorian*) que sonhou tanto com esse momento e hoje não está presente. O que sinto hoje, por não poder vê em seus olhos orgulhosos, e não poder abraçar é muito doloroso, mas saiba que te sinto à todo momento. Amo você até a eternidade.

“Quando você tem a possibilidade de lutar, quando você tem a fé, a esperança, aí depende de você realmente lutar, trabalhar e acreditar que você pode ir até o final”.
(Ayrton Senna)

RESUMO

ALMEIDA, Gisele Carolina, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2022. **Modelagem de dados em painel dinâmico para estimativa dos efeitos climáticos e econômicos na produtividade de cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro – Minas Gerais, Brasil.** Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientador: José Francisco de Oliveira Júnior.

O clima é um fator fundamental no cultivo da cana-de-açúcar, independentemente, dos avanços tecnológicos, proporcionando limitações e adaptações para a lavoura canavieira. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividade da cana-de-açúcar em Minas Gerais, através de um modelo com dados em painel dinâmico. Com esse intuito, utilizaram-se diversos bancos de dados, a saber: dados meteorológicos de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar, obtidos de produtos de reanálise (ERA5; CFSR, GLDAS e CHIRPS) e do Instituto Nacional de Meteorologia; dados de produtividade e produção anual de cana-de-açúcar obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; dados econômicos (preço médio real da cana-de-açúcar e preço médio ao consumidor do etanol hidratado) extraídos dos relatórios mensais da Secretária de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais, e por fim, os dados de preço médio dos insumos agropecuários, que foram obtidos pela Companhia Nacional de Abastecimento. Quanto à estratégia metodológica, empregou-se indicadores estatísticos (r , R^2 , BIAS, RMSE e MRE), testes de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen, e o modelo econométrico de dados em painel dinâmico. Os resultados obtidos através dos indicadores estatísticos mostram que a precipitação do produto CHIRPS possui padrão similar aos dados observados do INMET, seguido dado ERA5 para temperatura, radiação solar e umidade relativa. A aplicação dos testes de estatísticos (Mann-Kendall e Curvatura de Sen) mostrou no geral, tendência significativa de redução da precipitação para o trimestre out-dez, considerado o período de desenvolvimento da cana-de-açúcar; para o período chuvoso; e para o total anual de todos os municípios. Para a temperatura do ar, todos os trimestres; período seco; chuvoso; e o total anual, apresentaram tendência significativa de aumento. Já para a umidade relativa do ar, os resultados evidenciaram tendência significativa de diminuição para os trimestres jan-mar, abr-jun, jul-set, período seco, chuvoso e o total anual. No que diz respeito à radiação solar,

o trimestre jul-set, período seco e total anual apresentaram tendências estatisticamente significativas de aumento, porém baixas, para todos os municípios. Por fim, através do modelo de dados em painel dinâmico, temos que a produtividade é positivamente afetada por seus valores defasados de um ano e pelo preço médio do produto. Por outro lado, verificaram-se efeitos negativos e pequenos da precipitação e negativos e consideráveis da radiação solar. Sendo assim, os resultados obtidos estão em concordância com pesquisas empíricas recentes, relacionadas com as áreas de alterações climáticas e econômicas e seus efeitos na agricultura.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Validação. Clima. Economia. Produtividade. Modelos Econométricos.

ABSTRACT

ALMEIDA, Gisele Carolina, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2022. **Dynamic panel data modeling to estimate climatic and economic effects on sugarcane productivity in the Triângulo Mineiro – Minas Gerais, Brazil.** Advisor: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-advisor: José Francisco de Oliveira Júnior.

The climate is a fundamental factor in the cultivation of sugarcane, regardless of technological advances, providing limitations and adaptations for the sugarcane crop. Therefore, the objective of this work was to verify the effects of climatic and economic variables on the productivity of sugarcane in Minas Gerais, through a model with dynamic panel data. For this purpose, several databases were used, namely: meteorological data of precipitation, air temperature, relative humidity and solar radiation, obtained from reanalysis products (ERA5; CFSR, GLDAS and CHIRPS) and from the National Institute of Meteorology ; data on productivity and annual production of sugarcane obtained through the Brazilian Institute of Geography and Statistics; economic data (average real sugarcane price and average consumer price of hydrous ethanol) extracted from the monthly reports of the Secretary of State for Agriculture, Livestock and Supply of Minas Gerais, and finally, data on the average price of inputs agricultural products, which were obtained by the National Supply Company. As for the methodological strategy, statistical indicators were used (r , R^2 , BIAS, RMSE and MRE), Mann-Kendall trend and Sen curvature tests, and the econometric model of dynamic panel data. The results obtained through the statistical indicators show that the precipitation of the CHIRPS product has a pattern similar to the observed data from INMET, followed by the ERA5 data for temperature, solar radiation and relative humidity. The application of the statistical tests (Mann-Kendall and Sen's Curvature) showed, in general, a significant tendency of reduction of precipitation for the quarter Oct-Dec, considered the period of development of the sugarcane; for the rainy season; and for the annual total of all municipalities. For air temperature, every quarter; dry season; rainy; and the annual total, showed a significant upward trend. As for relative air humidity, the results showed a significant downward trend for the quarters Jan-Mar, Apr-Jun, Jul-Sep, dry and rainy seasons and the annual total. With regard to solar radiation, the July-September quarter, dry period and annual total showed statistically significant trends of increase, however low, for all municipalities. Finally, through the dynamic panel data model, we have that productivity is positively affected by its lagged

values of one year and by the average price of the product. On the other hand, there were negative and small effects of precipitation and negative and considerable effects of solar radiation. Therefore, the results obtained are in agreement with recent empirical research related to the areas of climate and economic changes and their effects on agriculture.

Keywords: *Saccharum spp.* Validation. Climate. Economy. Productivity. Econometric Models.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO GERAL	11
II. REFERÊNCIAS	14
CAPÍTULO 1 – Validação de variáveis climáticas estimadas por diferentes Datasets para o Estado de Minas Gerais – Sudeste do Brasil	17
Resumo	18
Abstract	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. METODOLOGIA	22
2.2. Reanálises	24
2.2.1 ERA5	24
2.2.2 GLDAS.....	25
2.2.3 CFSR.....	25
2.2.4 CHIRPS	25
2.3. Controle e tratamentos dos dados do INMET	26
2.4. Análise Estatística	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
3.1 Precipitação	27
3.2 Temperatura do ar	30
3.3 Radiação Solar	32
3.4 Umidade Relativa	33
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5. REFERÊNCIAS	36
CAPÍTULO 2 –Análise de tendências climáticas sobre o cultivo da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	44
Resumo	45
Abstract	46
1. INTRODUÇÃO	48
2. METODOLOGIA	49
2.1. Área de estudo e obtenção dos dados	49
2.2. Análise de tendências estatísticas	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
3.1 Análise das médias temporais das variáveis climáticas	53
3.2 Tendências nas séries históricas de precipitação	56
3.3 Tendências nas séries históricas de temperatura do ar	58

3.4 Tendências nas séries históricas de umidade relativa.....	60
3.5 Tendências nas séries históricas de radiação solar.....	63
3.4 Tendências nas séries históricas da área colhida e produção de cana-de-açúcar	66
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5. REFERÊNCIAS.....	70
CAPÍTULO 3 – Efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividade da cana-de-açúcar em Minas Gerais: uma abordagem com dados em painel dinâmico	75
Resumo.....	76
Abstract.....	77
1. INTRODUÇÃO	78
2. METODOLOGIA	80
2.1. Área de estudo	80
2.2. Banco de dados	81
2.3. Modelo Econométrico.....	82
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5. REFERÊNCIAS.....	90
III. CONSIDERAÇÕES GERAIS	97

I. INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do mundo e, justamente por isso, possui grande importância econômica. É cultivada em mais de 100 países, sendo o Brasil o maior produtor e exportador, seguido pela Índia e pela China (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2018). No que tange à sua finalidade, a cana-de-açúcar no Brasil é destinada principalmente para a produção de açúcar e etanol.

Essa cultura exerce papel fundamental tanto no mercado interno quanto no externo, sendo a região Nordeste do Brasil considerada o berço da cana-de-açúcar no país, graças ao açúcar da cana que foi o primeiro grande produto de exportação (NASCIMENTO & SANTOS, 2005; DE ABREU et al., 2013; CONAB, 2018). Atualmente, a cultura também é cultivada na região Centro-Sul, o que permite que a safra ocorra no país durante todo o ano, sendo de abril a novembro na região Centro-Sul, e de novembro a abril na região Nordeste do Brasil (NEB) (CONAB, 2019).

A variabilidade interanual da área plantada e da produção da cana-de-açúcar está relacionada principalmente a fatores como condições econômicas do mercado nacional e internacional e condições ambientais. No Brasil, foram produzidas na safra de 2021/2022 585,2 milhões de toneladas de cana. Já no estado de Minas Gerais, foram produzidos 64,04 milhões de toneladas, sendo a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba responsável por cerca de 70% da área plantada no estado (CONAB, 2022). Todavia, estes valores da safra 2021/2022 foram menores que os da safra anterior.

Conforme a Conab (2022), essa redução da produção canavieira está relacionada com as condições climáticas adversas registradas, tais como: a estiagem durante o ciclo produtivo das lavouras, as baixas temperaturas registradas entre junho e julho de 2021 e, também, os incêndios nos canaviais. Desta forma, iniciativas que visem à previsibilidade do impacto do mercado e das condições ambientais no sistema sucroalcooleiro são relevantes para a adoção de estratégias de gestão para melhoria da produtividade da cana-de-açúcar, aumento dos lucros e geração de empregos e renda (SALLES SCARPARI; GOMES FERREIRA DE BEAUCLAIR, 2009; CUADRA, et al. 2012; SOUSA, et al. 2012; SANT'ANNA, et al. 2016).

Nesse contexto, fica clara a importância de pesquisas realizadas para estimar a produtividade da cultura por meio do uso de dados agrônômicos, meteorológicos e socioeconômicos, considerando as especificidades regionais e intertemporais. De acordo com Marin et al. (2011) e Marin et al. (2012), a utilização de dados meteorológicos, juntamente com a aplicação de análises estatísticas, possibilita a identificação de tendências climáticas históricas, favorecendo maior cautela no monitoramento e otimização da produção, previsão de rendimento futuro, expansão das áreas para cultivo. Sendo assim, estudos envolvendo o setor agrícola e as mudanças climáticas apoiam tomadas de decisões para a criação de planos de adaptação e mitigação.

Dentre exemplos, alguns estudos com aplicações econométricas utilizaram modelos hedônicos com dados *cross-section* e dados em painel para analisar a influência do clima na agricultura (MENDELSON; NORDHAUS; SHAW, 1994; DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007; SILVA, 2019). Análises com dados em painel são metodologias propícias para avaliar os impactos das áreas plantadas na produção agrícola (MYTHILI, 2012); da oferta de produtos nas mudanças nos preços de produção e na volatilidade (HAILE; KALKUHL; VON BRAUN, 2016); das variáveis agrometeorológicas e econômicas na produtividade (FIGUEIRA; ROLIM, 2020). Um destaque dos modelos é o de dados em painel dinâmico que, além de controlar a endogeneidade¹ existente entre as variáveis, considera os efeitos intertemporais da produtividade ou produção.

No âmbito da cultura da cana-de-açúcar, distintos estudos averiguam a estimativa da produtividade através de diferentes métodos e modelos (VIDIGAL et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012). Entretanto, verifica-se que ainda são proeminentes abordagens que considerem a complexidade dos efeitos de múltiplas variáveis sobre a produtividade dessa cultura no Brasil e, em especial, a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Neste contexto, a presente tese tem por objetivo geral verificar os efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividade da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba em Minas Gerais, através de um modelo com

¹ Conforme Imbens e Wooldridge (2009), endogeneidade se refere amplamente a situações em que uma variável explicativa é correlacionada com o termo de erro.

dados em painel dinâmico. Para atender a este objetivo geral, a presente tese apresenta como objetivos específicos:

- i) avaliar o desempenho de diferentes bancos de dados em comparação com os dados do INMET para os municípios da mesorregião do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba, em Minas Gerais, para a estimativa da precipitação atmosférica, temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar.
- ii) caracterizar os elementos climáticos diretamente relacionados com a produção canavieira do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais; e
- iii) avaliar os efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividades da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais.

Ressalta-se, que a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba foi escolhida para realização deste trabalho por ser uma região com produção de cana-de-açúcar em plena expansão, além de existir poucos estudos que considerem as especificidades da região e das diferentes variedades de cana produzidas.

Além desta introdução geral, esta tese está dividida em quatro capítulos. Os três capítulos em sequência tratam-se de três artigos, elaborados para atender a cada um dos objetivos específicos propostos, respectivamente. O último capítulo compreende as considerações finais do estudo, que sintetiza os principais achados encontrados.

II. REFERÊNCIAS

- CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA**. Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2017/18, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-73, abril 2018.
- CONAB. 2019. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA**. Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2018/19, n. 4 - Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-73, setembro 2019.
- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 20/06/2022.
- CUADRA, S. V. et al. A biophysical model of sugarcane growth. **Gcb Bioenergy**, v.4, n.1, p. 36-48, 2012.
- DE ABREU, M. L.; SILVA, M.A.; TEODORO, I.; DE HOLANDA, L. A.; NETO, G.D.S. Growth and productivity of sugarcane varieties as affected by water availability in the Coastal Tablelands of the Alagoas State, Brazil **Rev. Bragantia**. Campinas (SP), v. 72, n.3, p.262-270, 2013.
- DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v.97, n.1, p. 354-385, 2007.
- FIGUEIRA, S. R. F.; ROLIM, G. de S. Economic and agrometeorological modeling of sugarcane productivity in São Paulo state, Brazil. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 6, p. 4836-4848, 2020.
- HAILE, M. G.; KALKUHL, M.; VON BRAUN, J. Worldwide acreage and yield response to international price change and volatility: a dynamic panel data analysis for wheat, rice, corn, and soybeans. In: **Food price volatility and its implications for food security and policy**. Springer, Cham, 2016. p. 139-165.

- MARIN, F. R. et al. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal, Madison**, v.103, p. 100-110, 2011.
- MARIN, F. R. et al. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. **Climatic Change**, v.1, p. 101-110, 2012.
- MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. **The American Economic Review**, v.84, n.4, p. 753-771, 1994.
- MYTHILI, G. Acreage and yield response for major crops in the pre-and post-reform periods in India: A dynamic panel data approach. 2012.
- NASCIMENTO, R. C.; SANTOS, F. A. A. Evolução da cultura da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas em relação aos maiores produtores do Brasil, 1980/1996. **Estação Científica**. Juiz de Fora (MG), v.1, n.2, p. 1-21, ago. 2005.
- OLIVEIRA, R. A. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.
- SALLES SCARPARI, M.; GOMES FERREIRA DE BEAUCLAIR, E. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Sci. agric.**, 2009.
- SANT'ANNA, A. C. ET AL. Ethanol and sugarcane expansion in Brazil: what is fueling the ethanol industry? **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 19, n. 1030-2017-2132, p. 163-182, 2016.
- SILVA, W. K. DE M. **Influência das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- SOUSA, P. N.; SCUR, G.; DE CASTRO SOUZA, R. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil: gargalos e proposições para seu desenvolvimento. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 7, n. 3, p. 145, 2012.

- VIDIGAL, V. G.; GOMES, M. F. M.; ROCHA-VIDIGAL, C. B.; SILVEIRA, G. F. Análise espacial da produtividade da cana-de-açúcar em Minas Gerais, 1990 a 2007. **Revista de Economia e Administração**, São Paulo, v.10, n.2, p. 241-261, abr/jun. 2011.

CAPÍTULO 1

Validação de variáveis climáticas estimadas por diferentes Datasets para a região do Triângulo Mineiro/Alto Parana, do Estado de Minas Gerais

Resumo: Os elementos climáticos são fundamentais e afetam o setor agrícola no mundo. No Brasil, principalmente Minas Gerais, há grande escassez de dados meteorológicos e, quando disponibilizados, apresentam baixa densidade espacial, falhas e descontinuidade na série temporal. Neste contexto, interpolação de dados medidos *in situ*, técnica de reanálise e combinação de dados de estações com sensoriamento remoto são frequentemente utilizadas. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de diferentes bancos de dados (ERA5, GLDAS, CFSR, CHIRPS) em comparação com os dados observados para a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba pertencente a Minas Gerais, Sudeste do Brasil (SEB). Os dados observados são oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período 2005-2019, sendo utilizados 8 estações meteorológicas devidamente distribuídas. Os resultados obtidos por meio dos indicadores estatísticos (r , R^2 , BIAS, RMSE e MRE) mostram que precipitação do produto CHIRPS possui um padrão similar aos dados observados, seguido dado ERA5 para temperatura, radiação solar e umidade relativa. Ambos os produto CHIRPS e a reanálise ERA5 são recomendados para serem usados em diversas finalidades relacionadas às pesquisas climáticas.

Palavras-chave: Precipitação; Temperatura; Reanálises; Estações Meteorológicas.

Validation of climate variables estimated by diferente Datasets for the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba region, in the State of Minas Gerais

Resumo: The climatic elements are fundamental and affect the agricultural sector in the world. In Brazil, mainly Minas Gerais, there is a great scarcity of meteorological data and, when available, they present low spatial density, flaws and discontinuity in the time series. In this context, interpolation of measured data in situ, reanalysis technique and combination of data from stations with remote sensing are widely used. Therefore, the aim of this study is to evaluate the performance of different databases (ERA5, GLDAS, CFSR, CHIRPS) in comparison with the observed data for the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba mesoregion belonging to Minas Gerais, Southeast Brazil (SEB). The observed data come from the National Institute of Meteorology (INMET) in the period 2005-2019, using 8 properly distributed weather stations. The results obtained through the statistical indicators (r , R^2 , BIAS, RMSE and MRE) show that the precipitation of the CHIRPS product has a pattern similar to the observed data, followed by the ERA5 data for temperature, solar radiation and relative humidity. Both the CHIRPS product and the ERA5 reanalysis are recommended to be used for a variety of purposes related to climate research.

Key-words: Precipitation; Temperature; Reanalysis; Weather Stations.

1. INTRODUÇÃO

O clima impacta todos os setores da sociedade e as mudanças climáticas representam um desafio sem precedentes para a humanidade (AHMED et al, 2011; GLEIXNER, DEMISSIE, DIRO, 2020; IPCC, 2021). O desafio é intensificado pela forte vulnerabilidade do setor agrícola as mudanças climáticas, em especial ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de clima, que podem comprometer a segurança alimentar e nutricional dos países, principalmente nas regiões de baixo acesso à tecnologia (DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007; BLANCO et al., 2017; JUHOLA et al., 2017; MO et al., 2017; COSTA et al., 2019). Norteada pela crescente pressão que a agricultura enfrenta em suprir o aumento da demanda mundial por alimentos e energia, em tempos de mudanças climáticas, a agricultura inteligente para o clima (*Climate-smart agriculture - CSA*) se torna uma abordagem necessária e urgente. A abordagem CSA visa transformar e reorientar os sistemas agrícolas para apoiar a segurança alimentar sob as novas realidades das mudanças climáticas, agrupando o aumento da produtividade, o aprimoramento da resiliência e a redução das emissões de gases de efeito estufa (LIPPER et al., 2017).

A espinha dorsal da abordagem CSA é a existência de bancos de dados agrônômicos e climáticos especializados, públicos e consistentes (DAMIANI et al., 2016). Atualmente esses conjuntos de dados são coletados ou estimados em volume crescente, compreendendo longas séries temporais, diversas escalas espaciais e variedade de informações, conhecido como “*big data*”. Existem bancos de dados climáticos com séries históricas para diferentes variáveis meteorológicas que são disponíveis publicamente. Geralmente esses dados são obtidos por técnicas de interpolação de dados medidos *in situ*, reanálise ou a combinação de dados de estações com sensoriamento remoto (PINTO et al., 2009; RAMPAZO; PICOLI; CAVALIERO, 2018; COSTA et al., 2019).

Os bancos de dados podem apresentar discrepâncias, tais como: falta de representatividade temporal, subestimativa ou superestimativa das variáveis, com erros aleatórios e sistemáticos que geralmente estão relacionados a características regionais (PINTO et al., 2009; VIEIRA JÚNIOR et al., 2009; STUKER et al., 2016; LIMBERGER & SILVA, 2018; NOGUEIRA, MOREIRA E VOLPATO, 2018; COSTA et al, 2019; ZULUAGA et al., 2020). Sendo assim, informações precisas, com boa cobertura espacial e temporal e disponibilidade de dados climáticos são de

fundamental relevância para estudos técnicos e científicos que embasam a tomada de decisão por agentes públicos e privados no âmbito da produção agrícola (RAMPAZO; PICOLI; CAVALIERO, 2018; COSTA et al., 2019).

No Brasil, o agronegócio é o principal setor da economia com a participação de 27,4% no PIB do país em 2021 (CEPEA, 2022). A região Sudeste do Brasil concentra a maior parte da riqueza gerada no agronegócio, com destaque para os estados de São Paulo e Minas Gerais (MG) (LUZ; FOCHEZATTO, 2022). Conhecido como grande produtor de café e leite, o estado de MG na verdade possui a produção agrícola mais diversificada do país, tendo o milho, a soja e a cana-de-açúcar grande participação na produção agropecuária total do Estado, cerca de 28% (ANDRADE BASTOS; GOMES, 2011; PIRES et al., 2014; COSTA et al., 2019; IBGE, 2019).

Em Minas Gerais (MG), especialmente a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba há ainda uma grande escassez de dados meteorológicos, além do fato de que os dados existentes são espacialmente descontínuos, estando sujeitos a apresentar falhas e descontinuidade temporal (XAVIER et al., 2016; COSTA et al., 2019). Dessa forma, o presente estudo avaliou o desempenho de diferentes bancos de dados em comparação com os dados do INMET para os municípios da mesorregião do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba, em Minas Gerais, durante o período 2005 a 2019, para a estimativa da precipitação atmosférica, temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo é a mesorregião do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba, localizada no estado de MG, no Sudeste do Brasil (SEB), nas latitudes 17°55'12''S e 20°41'30''S, longitudes 45°33'30''W e 51°02'18''W e altitude entre 323 a 1547 m. De acordo com o IBGE (2019), a região estado abrange uma área de aproximadamente 90.545 km², é constituído por 66 municípios, equivalendo 15,4% do território mineiro. Foram considerados na análise os municípios: Araxá; Capinópolis; Ituiutaba; Patos de Minas e Uberaba, considerados os maiores produtores de cana-de-açúcar de Minas Gerais (Figura 1).

O clima é típico da região Sudeste do Cerrado; tropical com verões chuvosos e quentes e invernos secos e frios. A precipitação anual é de aproximadamente 1214 mm, com cerca de 230 mm precipitado na estação chuvosa (outubro a março). A estação seca (maio a setembro) possui características marcante de déficit hídrico intenso, com acumulado mensal de chuva máxima de 318 mm e mínima de 131 mm. As temperaturas médias anuais variam de 21°C a 24°C. A região de estudo apresenta grande complexidade climática, devido aos diferentes fatores existentes em toda sua extensão (VIANELLO; MAIS, 1986; REBOITA et al., 2015).

Entre esses fatores, conforme Reboita et al (2015), essa região sofre influência da dinâmica de Massas de Ar Polar, que é responsável pela entrada de frentes frias e da Massa Equatorial Continental, responsável pela distribuição da umidade da região. O verão é definido por sucessões de dias com temperaturas elevadas que tem a influência da massa tropical atlântica continentalizada (mTAc), e dias com temperaturas amenas (inverno) motivado pela ação da massa polar atlântica (mPa). Há também significativa escassez de umidade e precipitação no inverno. Dessa maneira, os municípios da mesorregião de estudo compreendem um clima tropical com duas estações bem definidas, o verão chuvoso e com temperaturas elevadas e o inverno com escassez de chuvas e temperaturas amenas (MENDES; QUEIROZ, 2011).

Outro sistema meteorológico predominante na região de estudo é a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), que se desdobra da porção sul da região Amazônica ao litoral da Região Sudeste, deslocando sobre o Triângulo Mineiro, acarretando nebulosidade e chuvas intensas por dias e até semanas. Nos meses de inverno acontece a atuação de dois sistemas principais: mTAc, responsável por dias de temperaturas elevadas e baixa umidade relativa do ar, e a mPa com temperaturas amenas. As estações de primavera e outono são conhecidas por transição seca/chuvosa e chuvosa/seca, respectivamente (MENDES; QUEIROZ, 2011).

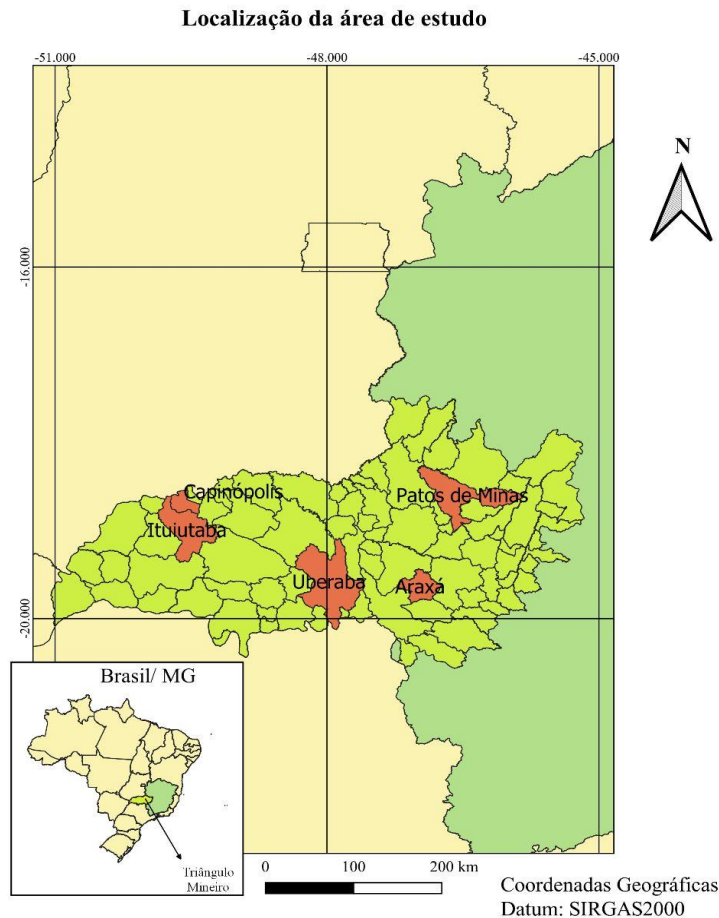


Figura 1: Localização das estações meteorológicas de Minas Gerais – Brasil, com suas respectivas mesorregiões, altitudes e os biomas predominantes, em especial o Triângulo Mineiro (9), destacando os municípios estudados. Fonte: Autor.

2.2 Banco de Dados

No presente trabalho, foram utilizados produtos de satélite e reanálise. Os conjuntos de reanálises são obtidos a partir de dados provenientes de modelos de circulação geral da atmosfera (CGA) com dados observados, sendo depois disponibilizados. Os dados de reanálise são produzidos por grandes centros de pesquisa meteorológica, tais como: i) NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), ii) NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), iii) NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), iv) ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) e v) japonês JMA (*Japan Meteorological Agency*) (FASULLO, 2012; LIMBERGER; SILVA, 2018). Cada centro tem seu respectivo modelo numérico operacional o que torna necessário à realização de estudo de intercomparação

(FASULLO, 2012; LIMBERGER; SILVA, 2018). Neste estudo foram utilizadas as seguintes reanálises: ERA5-Land, ERA5 e o CFSR. As informações estão descritas na Tabela 1.

Já o produto de satélite, utilizam modelos numéricos sofisticados de processos físicos para integrar dados de vários sistemas de observação terrestres e espaciais para produzir campos de estados e fluxos de água e energia que são fisicamente consistentes e espacial e temporalmente contínuos (FUNK et al, 2015; RIVERA; MARIANETTI; HINRICHS, 2018). Neste estudo foram utilizados os produtos de satélites GLDAS e o CHIRPS, cuja suas respectivas informações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações dos bancos de dados que foram utilizadas neste estudo.

Banco de Dados	Instituições/site	Resoluções		Variáveis	Período
		Espacial	Temporal		
ERA5	European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	0.25°x 0.25°	Horário	RS, P, T, UR	2005- 2019
GLDAS	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	0.25°x 0.25°	Horário	RS, P, T	2005 - 2019
CFSR	National Center for Environmental Prediction (NCEP)	0.312° x 0.312°	Horário	RS, P, T, UR	2005 - 2019
CHIRPS	University of California at Santa Barbara	0.05° x 0.05°	Horário	P	2005 - 2019

RS: Radiação Solar; P: Precipitação; T: Temperatura; UR: Umidade Relativa
Fonte: Autores.

2.2.1 ERA5

ERA5 é um produto de reanálise atmosférica global mais recente do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). O ERA5 é produzido através da combinação de um modelo de previsão numérica do tempo (PNT) com dados observacionais de satélites e observações terrestres (HERSBACH et al., 2020). Os dados ERA5 estão disponíveis no *Climate Data Store* em grades regulares de latitude-longitude com resolução de 0.25° x 0.25°, com parâmetros atmosféricos em 37 níveis de pressão e frequência horária. Esses dados estão disponíveis desde o período de 1950 (CAO et al, 2020; GLEIXNER, DEMISSIE, DIRO, 2020; HERSBACH et al., 2020; NOËL et al, 2020).

2.2.2 GLDAS

O *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) é um projeto desenvolvido com o objetivo de fornecer uma nova geração de dados climáticos espaciais e medidos na superfície (SILVA, 2013; SILVA et al., 2016). O GLDAS é fundamentado em um modelo global que proporciona uma reanálise dos dados provenientes de estações meteorológicas distribuídos em todo o planeta e dados de plataformas orbitais (RODELL et al., 2004; DE ARAÚJO et al., 2019). A base de dados do GLDAS está disponível no site da NASA e possui uma resolução de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, com várias variáveis para o balanço de energia, hídrico e parâmetros forçados, para o período de 2000 até o presente (AWANGE et al., 2014; DE ARAÚJO et al., 2019).

2.2.3 CFSR

A reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) foi desenvolvida pelo NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) com objetivo de simular a condição do domínio acoplado do sistema oceano-atmosférico-terra e gelo da superfície do mar com alta resolução (MENEZES; MOREIRA; KOBAYAMA, 2019). Os dados usados na aquisição da CFSR decorrem de diferentes fontes, tais como: radiossonda; observação de superfície por meio de equipamentos e sensores; micro-ondas; imagens de satélite; entre outros (SASHA et al., 2010). Os dados do CFSR estão disponíveis no site <<https://globalweather.tamu.edu/#pubs>> e o mesmo possui uma resolução de $0.312^\circ \times 0.312^\circ$, para o período de 1979 até o presente (MENEZES; MOREIRA; KOBAYAMA, 2019).

2.2.4 CHIRPS

O produto *Climate Hazard Group Infra Red Precipitation with Station* (CHIRPS) foi criada em colaboração com cientistas do *Earth Resources Observation Science* (EROS) do USGS, com objetivo de fornecer conjuntos de dados completos, confiáveis e atualizados para uma série de objetivos de alerta, como análise de tendências e monitoramento de secas sazonais (FUNK et al, 2015; RIVERA; MARIANETTI; HINRICHS, 2018). Os dados do CHIRPS possuem resolução espacial de $0,05^\circ$ e várias escalas temporais (mensal, decadal, pentadal ou etapas de tempo diárias), para o período de 1981 até o presente. Estão disponíveis no site <<https://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>> (FUNK et al, 2015; PAREDES-TREJO; BARBOSA; KUMAR, 2017).

2.3 Controle e tratamentos dos dados do INMET

Para este estudo foram usados dados das estações meteorológicas convencionais (EMC) e automáticas (EMA). No estado de MG são 49 EMC's e 51 EMA's distribuídas por todo o seu território. Na Figura 1 é apresentada a distribuição das estações EMC's e EMA's, uma vez que nesse estudo foram analisadas 5 estações EMC's e 3 EMA's. É importante destacar que as informações das variáveis temperatura do ar, umidade do ar e precipitação atmosférica foram obtidos das estações convencionais, enquanto que a variável radiação solar, foi obtida através das estações automáticas.

O período das séries temporais selecionado compreende os anos de 2005 a 2019, pois apenas a partir do ano de 2005 as estações apresentam dados com poucas falhas. Ressalta-se que para esse período todas variáveis e estações foram validadas. Os dados disponibilizados para realização do presente trabalho eram na unidade temporal de horas e foi feita a conversão para o anual, ou seja, foi encontrado a média diária, posteriormente, a média mensal e, assim, foi obtido a média anual das respectivas variáveis de estudo (temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa do ar). Enquanto que a variável precipitação pluviométrica, foi calculado a soma diária, posteriormente, a soma mensal, e logo após, foi obtido a soma anual.

2.4 Análise Estatística

A comparação entre os dados de estações convencionais e automáticas e dos diferentes bancos de dados, foi realizada com base nas médias anuais das respectivas variáveis meteorológicas: temperatura do ar; precipitação pluviométrica; radiação solar e umidade relativa do ar. Ressalta-se, que esses dados são disponibilizados diariamente, porém no presente trabalho, foi feito a conversão para o período anual e também foi feito a conversão para dados pontuais.

O processo de validação foi realizado com intuito verificar qual é o banco de dados que melhor representa as variáveis em estudo, comparado com a base de dados do INMET. As estatísticas utilizadas no processo foram: coeficiente de correlação (R^2); coeficiente de correlação de Pearson (r); erro quadrático médio (RMSE); Viés (BIAS) e o erro relativo médio (MRE). E suas respectivas equações são apresentadas na Tabela 2, em que X_i é a variável observada referente aos dados do

INMET; Y_i é a variável simulada referente aos distintos bancos de dados; e N é o número de observações.

Tabela 2: Métodos Estatísticos com suas respectivas equações utilizados no processo de validação.

Estadísticas	Descrição	Equações
R^2	Coefficiente de Determinação	$R^2 = \frac{(s_{X_i Y_i})^2}{s_{X_i X_i} s_{Y_i Y_i}} = r_{X_i Y_i} * r_{X_i Y_i}$
r	Coefficiente de Correlação de Pearson	$r_{X_i Y_i} = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{(\sum X_i)(\sum Y_i)}{n}}{\sqrt{\left[\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}\right] \left[\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}\right]}}$ $-1 \leq r_{X_i Y_i} \leq 1$
BIAS	Viés	$Viés = \frac{\sum Y_i - X_i}{N}$
RMSE	Erro Quadrático Médio	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{N}}$
MRE	Erro Relativo Médio	$MRE = \frac{100}{N} \sum \left \frac{Y_i - X_i}{X_i} \right $

Fonte: Autores.

Para interpretar os resultados obtidos por meio dos indicadores estatísticos (Tabela 2), tomaremos como base que quanto maior a estatística de R^2 e r , maior a relação entre X_i e Y_i e maior a qualidade de Y_i . E quanto menor o valor de BIAS, RMSE e MRE melhor Y_i (GEBRECHORKOS; HÜLSMANN; BERNHOFER, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico está dividido em quatro subtópicos, na qual, se apresenta o processo de validação com objetivo de analisar qual é o banco de dados que melhor representa as variáveis em estudo, sendo elas: precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar, comparado com a base de dados do INMET, entre os anos de 2005 a 2019.

3.1. Precipitação

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos da precipitação (mm/ano) para área de estudo. O produto CHIRPS e a reanálise GLDAS se destacaram na maioria das estações, pois ambos os coeficientes R^2 e r se aproximam de 1, exceto produto CFSR.

De todas as bases de dados pelo menos uma estação apresentou valores da estatística r de 80%. Sabe-se que o coeficiente R^2 está relacionado com o coeficiente r , como mencionado na Tabela 2 da subseção 2.4 (LIRA; NETO, 2006). Sendo assim, com relação ao coeficiente R^2 , os dados extraídos das reanálises do ERA5 (79% a 84%), CFSR (61% a 67%), GLDAS (84% a 88%) e do produto CHIRPS (82% a 95%) explicam a variabilidade dos dados observados (INMET) - (Tabela 3).

Tabela 3: Estatísticas para validação da variável precipitação pluviométrica (mm/ano) dos dados meteorológicos de superfície (INMET) e dos respectivos bancos de dados: ERA5; CFSR; GLDAS e CHIRPS, em função dos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Municípios	Banco de Dados	r	R^2	BIAS	RMSE	MRE
Araxá	ERA5	0,9026	0,8146	-403,3131	416,2042	26,2483
	CFSR	0,8162	0,6662	922,1058	1025,4710	60,3766
	GLDAS	0,9216	0,8494	-106,6224	201,6957	10,6681
	CHIRPS	0,9751	0,9509	30,3035	75,8074	3,8127
Capinópolis	ERA5	0,9010	0,8119	-213,8605	237,6001	16,1641
	CFSR	0,7807	0,6096	531,1930	702,8635	48,0554
	GLDAS	0,9226	0,8513	131,8030	165,1687	10,7326
	CHIRPS	0,9046	0,8182	116,2607	163,2877	10,3857
Ituiutaba	ERA5	0,8942	0,7996	-151,7243	224,3816	12,1515
	CFSR	0,8135	0,6618	566,0473	210,2030	52,8209
	GLDAS	0,9333	0,8710	119,0053	774,8563	12,2846
	CHIRPS	0,9425	0,8883	32,0168	191,0472	8,7359
Patos de Minas	ERA5	0,9173	0,8415	-147,0205	213,3248	11,2836
	CFSR	0,8099	0,6559	618,1038	702,5976	52,2109
	GLDAS	0,9370	0,8779	-67,6365	132,6793	6,9717
	CHIRPS	0,9623	0,9259	24,5512	96,3091	7,0053
Uberaba	ERA5	0,9182	0,8432	9,0335	177,5110	9,0335
	CFSR	0,8077	0,6524	35,9979	647,9406	35,9979
	GLDAS	0,9181	0,8429	12,4091	222,2727	12,4091
	CHIRPS	0,9201	0,8466	11,7394	233,5083	11,7394

Fonte: Autores.

Com base nos coeficientes r e R^2 , observa-se que o CHIRPS obteve os maiores valores, ao contrário da reanálise CFSR, com os menores valores, em comparação com as demais bases de dados. Resultado semelhante foi obtido por Costa et al. (2019) para o conjunto CHIRPS, com uma “alta correlação” (99%) para SEB. Ressalta-se, que todas as regiões brasileiras apresentaram coeficientes de R^2 superiores a 92% (COSTA et al., 2019). Conforme os autores mencionados, esses

valores estão associados com o período de dados observados, o número de estações por mesorregião e a respectiva resolução espacial.

Segundo Santiago et al. (2016), é necessário considerar a complexidade da simulação da precipitação, pois a mesma sofre diversas influências de fenômenos atmosféricos, além da discrepância de escala espacial entre os valores simulados e observados, uma vez que um determinado modelo climático global gera uma informação em grades, e a estação meteorológica faz medida in situ.

Conforme, Compo et al. (2006), Smith et al. (2012) e Costa et al. (2019), novos produtos são gerados apresentando melhorias aceitáveis na extensão, resolução espacial e resolução temporal. Isso concede conseguir dados para quase todo o globo a cada três horas e com resoluções espaciais de aproximadamente 0,05°.

Os valores obtidos de Bias (vieses) obedecem ao sinal, sendo o viés com um sinal positivo considera-se que houve superestimação, ao contrário, subestimação (COSTA et al., 2019). Assim, os dados do CHIRPS versus os dados observados obtiveram os seguintes bias: Araxá (30,30 mm/ano), Capinópolis (116,26 mm/ano), Ituiutaba (32,02 mm/ano), Patos de Minas (24,55 mm/ano) e Uberaba (11,74 mm/ano), com superestimação, respectivamente.

Para a reanálise de CFSR, todas as estações também com superestimação e valores entre 36 mm/ano a 922,11 mm/ano (Tabela 3). Costa et al. (2019), encontraram valores de precipitação superestimados em aproximadamente 5% para o CHIRPS na SEB. Os autores relatam que tal fato pode estar associado aos sistemas meteorológicos atuante na região Sudeste durante as estações do ano, geralmente marcadas por uma estação seca e outra chuvosa (COSTA et al., 2019).

O RMSE obtido do CHIRPS apresentou os menores valores, em comparação a reanálise de CFSR, por exemplo, Araxá (1025,47 mm). Ressalta-se que o produto CHIRPS para a estação Araxá foi a que apresentou o menor RMSE (75,81 mm) (Tabela 3). Analisando o RMSE e o coeficiente r , observa-se que os resultados de ambos têm uma relação direta, ou seja, obteve os maiores erros e também obteve os menores coeficientes de correlação, que é o caso da reanálise de CFSR. Quando é analisado o RMSE e o BIAS, espera-se que quanto maior o erro mais o modelo subestima ou superestima os dados, que também é o caso da reanálise de CFSR.

Analisando o desempenho do produto de precipitação CHIRPS para Minas Gerais, Nogueira et al. (2018) obtiveram resultados referentes a estatística RMSE variando entre 10,25 mm a 21,85 mm. Os autores encontraram discrepâncias entre

os dados observados e os do CHIRPS. Paredes-Trejo, Barbosa e Lakshmi (2017), relatam que esse fato pode estar relacionado a uma redução no número de estações usadas para gerar dados do CHIRPS ao longo dos anos.

O MRE é uma medida estatística da precisão de previsão, analisando o mesmo na Tabela 3, pode-se verificar que o produto do CHIRPS apresentou os menores valores de MRE (Araxá (3,81 mm); Capinópolis (10,39 mm); Ituiutaba (8,74 mm)), quando comparado com a reanálise CFSR que apresentou os maiores valores de MRE, variando entre 36 mm a 60,38 mm.

Enfim, analisando todos esses resultados obtidos pelas reanálises e produto para a variável precipitação pluviométrica, foi possível observar que o produto elaborado pelo CHIRPS é a que melhor representa os dados observados (INMET), considerando os parâmetros estatísticos avaliados. De acordo com a literatura, algumas pesquisas avaliaram a acurácia do produto CHIRPS para algumas regiões do globo, tais como: África Ocidental, Moçambique, Chile, Bacia do Adige (Itália), Brasil, e o estado de Minas Gerais, e as mesmas destacam a confiabilidade nos dados do produto CHIRPS (TOTÉ et al., 2015; DEMBÉLÉ et al., 2016; DUAN et al., 2016; ZAMBRANO et al., 2017; NOGUEIRA et al., 2018; COSTA et al., 2019). Portanto, o produto CHIRPS, pode ser usado no preenchimento de falhas, em estudos de cenários futuros, entre outros.

3.2 Temperatura do Ar

Analisando a Tabela 4, foi possível observar através do coeficiente de correlação r que a base de dados ERA5 variam entre 42% a 84%; a CFSR entre 12% a 86% e a GLDAS entre -3% a 87%, uma vez que, a ERA5 apresentou os maiores valores da estatística. Como o coeficiente de determinação (R^2) é associado com o coeficiente r ($R^2 = r^2$), seus resultados são semelhantes e já expressos em percentuais. Portanto, com base na estatística R^2 foi possível observar que os valores determinam em termos percentuais o quanto os dados extraídos das reanálises do ERA5 (18% a 71%), GLDAS (0,1% a 76%) e CFSR (2% a 74%) explicam a variabilidade dos dados observados (INMET) (Tabela 4).

A partir dos coeficientes r e R^2 foi possível observar que o ERA5 apresentou os maiores valores, com exceção da estação de Ituiutaba (GLDAS), enquanto o CFSR apresentou os menores, quando comparado com os demais. Como relatado na

subseção 3.1, certamente, esses valores estão associados com a resolução espacial e o período de dados observados. Analisando os valores de Bias do ERA5, pode-se observar que para as estações Araxá (0,56°C) e Capinópolis (0,28°C), ocorreu uma superestimação, respectivamente (Tabela 4). Já para reanálise CFSR, todas as estações apresentaram uma subestimação entre -2,14°C a 0,87°C (Tabela 4).

Tabela 4: Estatísticas para validação da variável temperatura (°C) dos dados meteorológicos de superfície (INMET) e dos respectivos bancos de dados: ERA5; CFSR e GLDAS, em função das mesorregiões do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Municípios	Banco de Dados	r	R ²	BIAS	RMSE	MRE
Araxá	ERA5	0,8431	0,7108	0,5550	0,7067	2,6815
	CFSR	0,8614	0,7420	-0,8668	0,9670	4,3629
	GLDAS	0,8698	0,7566	-1,3319	1,4146	6,4482
Capinópolis	ERA5	0,7466	0,5575	0,2840	0,4841	1,7202
	CFSR	0,1249	0,0156	-1,5067	1,6945	6,0515
	GLDAS	0,7253	0,5261	-1,4350	1,5033	5,7784
Ituiutaba	ERA5	0,6455	0,4166	0,1761	0,3162	1,1606
	CFSR	0,1296	0,0168	-1,5313	1,6227	6,2374
	GLDAS	0,8337	0,6950	-1,7910	1,8237	7,3034
Patos de Minas	ERA5	0,6815	0,4645	-0,5396	0,6210	2,3814
	CFSR	0,6497	0,4221	-2,1355	2,1592	9,4494
	GLDAS	0,3148	0,0991	-1,9198	1,9569	8,4972
Uberaba	ERA5	0,4248	0,1805	-0,0864	0,4236	1,6007
	CFSR	0,3368	0,1135	-1,6885	1,7696	7,2190
	GLDAS	-0,0331	0,0011	-2,5201	2,5551	10,7702

Fonte: Autores.

Analisando o erro global nas previsões relativas ao valor real, denominado como RMSE, pode-se observar que o banco de dados do ERA5 apresentou os menores valores, quando comparado com GLDAS, o qual, apresentou valores de RMSE altos, tal como, para as estações Araxá (1,41°C), Ituiutaba (1,82°C) e Uberaba (2,56°C) (Tabela 4). Verificando os resultados obtidos do RMSE e o coeficiente *r* do ERA5, foi possível observar uma relação direta entre ambos, ou seja, os casos de menores erros também foram os de maiores coeficientes de correlação. A partir dos resultados obtidos do RMSE e BIAS da reanálise GLDAS, foi possível observar que quanto maior é o erro mais o modelo subestima os dados (Tabela 4).

Através dos resultados obtidos da estatística MRE apresentados na Tabela 4, pode-se observar que o ERA5 apresentou os menores valores de MRE, variando entre 1,16°C a 2,68°C, quando comparado com o GLDAS que apresentou os maiores

valores (Araxá (6,45°C); Ituiutaba (7,30°C) e Uberaba (10,77°C). Por fim, analisando todos os resultados obtidos pelos diferentes bancos de dados para a variável temperatura do ar, pode-se observar que a reanálise ERA5 é a que melhor representa os dados observados (INMET), a partir dos parâmetros estatísticos avaliados. Logo, esse banco de dados (ERA5), é recomendado para ser utilizado no preenchimento de falhas, em estudos de cenários futuros, entre outros.

3.3 Radiação Solar

A análise de validação dos diferentes bancos de dados foi executada para as variáveis precipitação pluviométrica, temperatura do ar e a umidade relativa, considerando as cinco estações do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba (Araxá, Capinópolis, Ituiutaba, Patos de Minas e Uberaba), enquanto, para radiação solar, o mesmo só foi realizado para as estações Araxá e Ituiutaba, devido à baixa qualidade das informações das estações (Tabela 5).

Tabela 5: Estatísticas para validação da variável radiação solar (J/m^2) dos dados meteorológicos de superfície (INMET) e dos respectivos bancos de dados: ERA5; CFSR e GLDAS, em função das mesorregiões do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Municípios	Banco de Dados	r	R ²	BIAS	RMSE	MRE
Araxá	ERA5	0,5792	0,3355	0,9264	2,5445	13,5264
	CFSR	0,5468	0,2990	2,1125	3,2425	17,4720
	GLDAS	0,5568	0,3101	1,4362	2,7420	15,0594
Ituiutaba	ERA5	0,8029	0,646	2,8632	3,0344	17,7073
	CFSR	0,7630	0,5822	4,5174	4,6509	27,7154
	GLDAS	0,7458	0,5562	3,6731	3,8527	22,7048

Fonte: Autores.

Os resultados do coeficiente r da radiação solar para os diferentes bancos de dados da estação Ituiutaba apresentaram valores da estatística r variando de 75% a 80%, enquanto, para Araxá os valores foram mais baixos variando de 55% a 58%. Segundo Lira e Neto (2006) e, a Tabela 2 (Subseção 2.4), o coeficiente de determinação (R^2) está correlacionado com o coeficiente r . Logo, a partir da Tabela 5, pode-se observar que os valores de R^2 especificam em termos percentuais o quanto os dados extraídos das reanálises do ERA 5 (34% e 65%), CFSR (30% e 58%) e o GLDAS (31% a 56%) explicam a variabilidade dos dados observados de radiação solar (INMET).

Verificando os valores de Bias para os diferentes bancos de dados, pode-se observar que para as duas estações ocorreu uma superestimação variando entre 0,93 J/m² a 4,52 J/m² (Tabela 5). Tais resultados também foram encontrados por Zuluaga et al. (2020), que analisando a radiação solar de onda curta descendentes (DSWR) para o Brasil, identificou que todos os conjuntos de dados (ERA5, MERRA2, JRA55, CFSR (v1), CFSR (v2) e GMFD) superestimam os valores de DSWR para região Sudeste.

Através dos resultados obtidos do RMSE, pode-se observar que os valores para ERA5 variam de 2,54 J/m² a 3,03 J/m², com valor mais baixo na estação de Araxá e mais alto em Ituiutaba. Enquanto, os valores de RMSE do CFSR variam entre 3,24 J/m² (Araxá) e 4,65 J/m² (Ituiutaba) (Tabela 5). Resultado semelhante foi identificado por Zuluaga et al. (2020), que encontraram valores de BIAS para o conjunto de dados ERA5 em torno de 1 W/m² e de RMSE próximos de 4 W/m². Enquanto, para o banco de dados CFSR, os valores obtidos de BIAS ficaram em torno de 15 W/m² e de RMSE próximos de 8 W/m² (ZULUAGA et al., 2020). Por outro lado, observando os resultados obtidos da estatística MRE apresentados na Tabela 5, observa-se que o ERA5 apresentou os menores valores de MRE, quando comparado com o CFSR, na qual, apresentou os maiores valores.

Os resultados obtidos pelos diferentes bancos de dados para a variável radiação solar, indicam que a reanálise ERA5 é a que melhor representa os dados observados (INMET), a partir dos parâmetros estatísticos avaliados. Enquanto, o CFSR teve um desempenho bem abaixo do melhor resultado. Zuluaga et al. (2020), também concluíram que o ERA5 é uma excelente opção para investigar DSWR em todo Brasil, combinando bem com as tendências climatológicas observadas. Logo, o conjunto de dados ERA5, é recomendado para ser utilizado no preenchimento de falhas, em estudos de cenários futuros, entre outros.

3.4 Umidade Relativa

De acordo com a Tabela 6, pode-se observar pelos resultados obtidos da estatística r que a reanálise ERA5 na maioria das estações são as que mais se aproximam de 1, enquanto a CFSR é a que menos se aproxima. Analisando a Tabela 2 apresentada na subseção 2.4 e, os argumentos mencionados de Lira e Neto (2006), percebe-se que o coeficiente de determinação (R^2) está correlacionado com o

coeficiente r . Logo, através da estatística R^2 foi possível observar que os valores determinam em termos percentuais o quanto os dados extraídos das reanálises do ERA5 (27% a 96%) e CFSR (19% a 87%) explicam a variabilidade dos dados observados (INMET) (Tabela 6).

Também foi possível observar, que o ERA5 apresentou valores de R^2 próximos à 1, exceto para a estação de Uberaba, de acordo com Camparotto et al. (2013), valores próximos a 1 mostram a maior proximidade do comportamento das variáveis (Tabela 6). A partir dos coeficientes r e R^2 , apresentados na Tabela 6, observa-se que a reanálise ERA5 apresentou os maiores valores, enquanto a reanálise CFSR as menores.

Tabela 6: Estatísticas para validação da variável umidade relativa (%) dos dados meteorológicos de superfície (INMET) e dos respectivos bancos de dados: ERA5 e CFSR, em função das mesorregiões do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Municípios	Banco de Dados	r	R^2	BIAS	RMSE	MRE
Araxá	ERA5	0,9775	0,9555	0,5928	1,3164	1,7140
	CFSR	0,9049	0,8188	9,7298	10,2663	14,5325
Capinópolis	ERA5	0,9798	0,9600	-4,8132	4,8981	7,0981
	CFSR	0,9343	0,8728	4,7040	6,2424	7,7725
Ituiutaba	ERA5	0,9510	0,9044	-4,8933	5,1450	7,2091
	CFSR	0,9283	0,8618	3,6739	5,4531	6,8242
Patos de Minas	ERA5	0,9206	0,8474	0,7937	1,7021	1,8502
	CFSR	0,8655	0,7491	10,8088	11,8077	16,0945
Uberaba	ERA5	0,5180	0,2683	-1,9408	3,7491	4,6544
	CFSR	0,4379	0,1917	10,4857	12,0538	15,8026

Fonte: Autores.

Segundo Costa et al. (2019), o BIAS corresponde à média dos erros individualizados e é normalmente usado para verificar se existe subestimativa ou superestimativa média dos valores estimados. Sendo assim, comparando os dados do produto ERA5 versus dados INMET, pode-se observar que as estações Capinópolis (-4,81%), Ituiutaba (-4,89%) e Uberaba (-1,94%) apresentaram uma subestimação entre ambos (Tabela 6). Enquanto, as estações Araxá (0,59%) e Patos de Minas (0,79%) se destacaram com uma superestimativa em comparação entre os dados do INMET e do ERA5.

De acordo com Bayissa et al. (2017) e Costa et al. (2019), se o BIAS é igual ou aproximadamente a zero, pode-se afirmar que não existe erro sistemático ou tendência no conjunto de dados estimados. Logo, os resultados obtidos da estatística BIAS entre os dados ERA5 e o INMET, para as estações Araxá e Patos de Minas no presente trabalho, conferem com a afirmação dos autores mencionados anteriormente (Tabela 6). A comparação entre os dados da reanálise CFSR e INMET, mostra que todas estações apresentaram valores de umidade relativa superestimados variando entre 3,67% a 10,81%, apresentando as maiores superestimativas em relação aos dados do INMET (Tabela 6).

Ainda, observa-se que os valores obtidos de RMSE entre os dados ERA5 e o INMET variam de 1,32% a 5,15%. Já entre os dados CFSR e o INMET, os valores de RMSE estão entre 5,45% a 12,05%. Observando os resultados da estatística MRE, pode-se verificar que a reanálise ERA5 apresentou os menores valores, quando comparado com o CFSR, que está variando de 6,82% a 16,09%.

Com base nos resultados obtidos pelos dois bancos de dados, a partir das estatísticas avaliadas para a variável umidade relativa, tem-se que a reanálise ERA5 é a que melhor representa os dados do INMET, enquanto, o CFSR apresenta um baixo desempenho. Logo, o conjunto de dados ERA5, é recomendado para ser utilizado no preenchimento de falhas, em cenários futuros, entre outros.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo é avaliado o desempenho de diferentes bancos de dados (ERA5, CFSR, GLDAS e CHIRPS) em comparação os dados das estações meteorológicas de superfície do INMET para a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Foi possível determinar qual o banco de dados representa melhor os elementos meteorológicos (precipitação atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar).

Para a precipitação pluviométrica, quando comparado ao ERA5, GLDAS e CHIRPS, a reanálise CFSR apresentou baixo desempenho. Enquanto que o produto CHIRPS apresentou o melhor desempenho, uma vez que os resultados das estatísticas r (0,90 a 0,98), R^2 (0,82 a 0,95), confirmam que o mesmo apresentou uma

“forte correlação” com os dados do INMET para todas as estações do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Ao analisar a variável temperatura do ar, os resultados dos coeficientes r (0,42 a 0,84) e R^2 (0,18 a 0,71) demonstram que a reanálise ERA5 apresenta uma “forte correlação” com os dados observados do INMET para maioria das mesorregiões de Minas Gerais, superestimando entre 0,18°C/ano a 0,56°C/ano (BIAS) os dados do INMET. Os dados da reanálise CFSR apresentaram o menor desempenho comparado com os outros bancos de dados de temperatura, superestimando entre -2,14°C/ano a -0,87°C (BIAS) os dados observados obtidos pelo INMET.

Quanto à radiação solar, os resultados mostram que os dados do ERA5 têm um bom ajuste ($0,34 \leq R^2 \leq 0,65$) com os dados do INMET. Em geral, os dados de radiação solar do ERA5 apresentaram RMSE, BIAS e MRE menores do que as apresentadas pelo GLDAS e CFSR durante o período de estudo. Ressalta-se que a reanálise CFSR apresentou o menor desempenho quando comparado com os demais bancos de dados.

Em relação a variável umidade relativa, o ERA5 apresentou o melhor desempenho em relação aos dados do INMET. Obtendo valores das estatísticas r e R^2 próximos à 1, e os menores valores de BIAS, RMSE e MRE, quando comparado com os demais bancos de dados para maioria das estações do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

No geral, considerando os resultados obtidos através das estatísticas (r , R^2 , RMSE, BIAS, MRE), é possível concluir que o produto CHIRPS é uma excelente opção para ser utilizada no processo de validação da precipitação para a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba no período de 2005 a 2019, e o ERA5 para as variáveis temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa. Portanto, o CHIRPS e o ERA5 são recomendados para serem utilizados para as diversas finalidades relacionadas às pesquisas climáticas.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Syud Amer et al. Climate volatility and poverty vulnerability in Tanzania. **Global environmental change**, v. 21, n. 1, p. 46-55, 2011.

- ANDRADE BASTOS, S. Q.; GOMES, J. E. Dinâmica da agricultura no Estado de Minas Gerais. Análise estrutural-diferencial para o período 1994-2008. **RURIS-Revista do Centro de Estudos Rurais-UNICAMP**, v. 5, n. 2, 2011.
- ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.
- AWANGE, Joseph L. et al. Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. **Advances in water resources**, v. 74, p. 64-78, 2014.
- BAYISSA, Y. et al. Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 669, 2017.
- BRAGA, N. I.; MONTENEGRO, R. L. G. Efeitos das mudanças climáticas sobre a agropecuária de Minas Gerais: uma abordagem contemporânea. **Novos Cadernos NAEA**, v. 23, n. 3, 2021.
- BRASIL. Resolução n. 72, de 14 de julho de 1941 Fixa o quadro de divisão regional do Brasil, para fins práticos, promove a sua adoção pela estatística brasileira e dá outras providências. 1941a. Disponível em: <
<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=711>.
> Acessado em: <26 de novembro de 2020>.
- CAO, B. et al. The ERA5-Land soil temperature bias in permafrost regions. **The Cryosphere**, v. 14, n. 8, p. 2581-2595, 2020.
- CAMPAROTTO, L. B. et al. Validação de dados termopluviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 665-671, 2013.
- CASTANHO, R. B.; SOUTO, T. S. Produção de cana de açúcar na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. *Brazilian Geographical Journal*, Ituiutaba, v. 4, n. 1, p. 27-54, jan./jun. 2013.

- CEPEA (2022). PIB do agronegócio cresceu abaixo das projeções. https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_PIB_JAn_Dez_2021_Mar%C3%A7o2022.pdf
- COMPO, G. P.; WHITAKER, J. S.; SARDESHMUKH, P. D. Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 2, p. 175-190, 2006.
- COSTA, J. C. et al. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- DAMIANI, Ernesto et al. Big data threat landscape and good practice guide. **European Union Agency For Network And Information Security**, 2016.
- DE ARAÚJO, M. L. S. et al. Caracterização Espaço-Temporal Dos Componentes Do Balanço De Radiação E Calor Na Região De Transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- DE SOUZA, A. G.; CLEPS JUNIOR, J. 2009. Expansão da Cana-de-Açúcar no Triângulo Mineiro e os Efeitos Sobre a Agricultura Familiar e o Trabalho Rural. **Revista Tópos**, v.3, n.2, p.8-35.
- DEMBÉLÉ, M.; ZWART, S. J. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 17, p. 3995-4014, 2016.
- DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v.97, n.1, p. 354-385, 2007.
- DINIZ, A.M.A. & BATELLA, W.B. 2005. O Estado de Minas Gerais e suas regiões: um resgate histórico das principais propostas oficiais de regionalização. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia 17(33): 59–77.
- DUAN, Z. et al. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. **Science of the Total Environment**, v. 573, p. 1536-1553, 2016.

- FASULLO, J. A mechanism for land-ocean contrasts in global monsoon trends in a warming climate. **Climate Dynamics**. Vol. 39, p. 1137-1147, 2012.
- FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.
- GEBRECHORKOS, S. H.; HÜLSMANN, S.; BERNHOFER, C. Avaliação de múltiplas fontes de dados climáticos para a gestão de recursos ambientais na África Oriental. **Hidrologia e Ciências do Sistema Terrestre**, v. 22, n. 8, pág. 4547-4564, 2018.
- GLEIXNER, S.; DEMISSIE, T.; DIRO, G. T. Did ERA5 Improve Temperature and Precipitation Reanalysis over East Africa? **Atmosphere**, v. 11, n. 9, p. 996, 2020.
- HERBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Regiões, mesorregiões geográficas do Brasil. Brasília: IBGE, 2019.
- IPCC **Climate Change 2021: The Physical Science Basis** (eds Masson-Delmotte, V. et al.) (Cambridge Univ. Press, in the press).
- LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 20-37, 2018.
- LIPPER, Leslie et al. Agricultura inteligente para o clima: construindo resiliência às mudanças climáticas. **Springer Nature**, 2017.
- LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de Pearson. **Ciência & Engenharia**, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, 2006.

- LUZ, Antônio da; FOCHEZATTO, Adelar. O transbordamento do PIB do Agronegócio do Brasil: uma análise da importância setorial via Matrizes de Insumo-Produto. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, 2022.
- MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. Economia da mudança do clima no Brasil. 2011.
- MATOS, P.F., and MARAFON, G.J. O setor sucroenergético no Brasil: efeitos e contradições. In: MARAFON, G.J., ARIAS, L.Q., and SÁNCHEZ, M.A., orgs. Apresentação. In: Estudos territoriais no Brasil e na Costa Rica (online). Rio de Janeiro: EDUERJ, 2018, pp. 41-59. ISBN 978-85-7511- 499-5.
- MENDES, P. C.; QUEIROZ, AT de. Caracterização climática do município de Ituiutaba-MG. **Geografia do Brasil Central: enfoques teóricos e particularidades regionais. Uberlândia: Assis Editora**, 2011.
- MENEZES, D. de; MOREIRA, L. L.; KOBAYAMA, M. É sempre adequado o uso dos dados de reanálise (CFRS)? estudo de caso na bacia do Rio Maquiné/RS. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (23.: Foz do Iguaçu, 2019). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2019**, 2019.
- NOËL, B. et al. Brief communication: CESM2 climate forcing (1950-2014) yields realistic Greenland ice sheet surface mass balance. **Cryosphere**, v. 14, n. 4, p. 1425-1435, 2020.
- NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Evaluating Precipitation Estimates from Eta, TRMM and CHRIPS Data in the SouthSoutheast Region of Minas Gerais State—Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 313, 2018.
- PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, TV L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of arid environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.
- PINTO, L. I. C. et al. Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 461-472, 2009.
- PIRES, M. V. et al. Percepção de produtores rurais em relação às mudanças climáticas e estratégias de adaptação no estado de Minas Gerais, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 431-440, 2014.

- QUADRO, M. F. L. de et al. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152-162, 2012.
- RAMPAZO, N. A. M.; PICOLI, M. C. A.; CAVALIERO, C. K. N. Comparação entre dados meteorológicos provenientes de sensoriamento remoto (modelados e de satélites) e de estações de superfície (Comparison of meteorological data obtained by remote sensing (from models and satellites) and weather stations data). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 412-426, 2018.
- REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais (Climate Aspects in Minas Gerais State). **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17, 2015. Resolução n. 77, de 17 de julho de 1941. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=7115>>. Acessado em: <26 de novembro de 2020>.
- RIVERA, J. A.; MARIANETTI, G.; HINRICHS, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. **Atmospheric Research**, v. 213, p. 437-449, 2018.
- RODELL, Matthew et al. The global land data assimilation system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004.
- SASHA, S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1058, 2010.
- SANTIAGO, G. A. C. F. et al. Avaliação de destreza e das projeções do cenário de mudanças climáticas A1B-Eta-HadCM3 para o estado de Pernambuco. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 33, n. 2, 2016.
- SIAMIG - Sindicato da indústria de fabricação do álcool no estado de Minas Gerais. Perfil da produção. Available from: <<http://www.siamig.com.br/cache/Documentos/perfilproducaosite.pdf>>. Accessed: Jan. 28, 2021.

- SILVA, F. B. **Modelagem da produtividade primária bruta na Amazônia**. 2013. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo.
- SILVA, F. B. et al. Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 330-336, 2016.
- SMITH, T. M. et al. Improved reconstruction of global precipitation since 1900. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 29, n. 10, p. 1505-1517, 2012.
- 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. 284-290, 2016.
- TONIETTO, J. et al. Caracterização macroclimática e potencial enológico de diferentes regiões com vocação vitícola de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 234, p. 32-55, 2006.
- VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 125-145, 2010.
- VARGAS, G. M.; MICHELLOTTO, B. D. G. Novas dinâmicas regionais: As consequências da expansão da cultura da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro – MG. *Geografia*, Rio Claro, v. 36, n. 1, p. 5-22, jan./abr. 2011.
- VIANELLO, R. L; MAIA, L. F. P. G. Estudo preliminar da climatologia dinâmica do estado de Minas Gerais. In: **IV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, 1986. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbmfiles/15b54829593da3f5d6971afaabadf515ca.pdf>>. Acesso em: 27 novembro de 2020.
- VIANNA, N. B. et al. Pedogeomorfologia, morfometria de bacia hidrográfica e uso dos solos como fatores condicionantes de qualidade e quantidade de água na APA do Rio Uberaba, triângulo mineiro. 2018.

- VIEIRA JUNIOR, P. A. et al. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 39, n. 2, p. 412-420, 2009.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, JohnWiley & Sons, Ltd, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. ISSN 1097-0088. Available from Internet: <<http://dx.doi.org/10.1002/joc.4518>>.
- ZAMBRANO, F. et al. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. **Atmospheric Research**, v. 186, p. 26-42, 2017.
- ZANZARINI, R. M.; SANTOS, J. R.; ALBINO, K. G. A expansão da cana-de-açúcar no triângulo mineiro - uma análise das alterações de cultivo no município de Araguari, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. Anais... Viçosa: UFV, 2009. p. 23. Available from: <<http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhoscompletoseixo11/078.pd>> Accessed: Ago. 31, 2021.
- ZULUAGA, C. F. et al. Climatology and trends of downward shortwave radiation over Brazil. **Atmospheric Research**, p. 105347, 2020.
- ZHAO, Duli; LI, Yang-Rui. Mudanças climáticas e produção de cana-de-açúcar: impacto potencial e estratégias de mitigação. **Jornal Internacional de Agronomia**, v. 2015, 2015.

CAPÍTULO 2

Análise de tendências climáticas sobre o cultivo da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba

Resumo: O clima é um fator fundamental para o melhor desenvolvimento e crescimento da cultura da cana-de-açúcar, independentemente, dos avanços tecnológicos, proporcionando limitações e adaptações para a lavoura canavieira. Sendo assim, testes estatísticos para identificação de tendências climáticas históricas, podem ajudar no monitoramento e otimização da produção da cultura e nos planos de mitigação e adequação para os possíveis impactos acarretados pelas mudanças climáticas ao setor canavieiro. Nesse sentido, o presente estudo objetiva caracterizar e analisar o componente de tendência dos elementos climáticos diretamente relacionados com a produção canavieira do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Para tanto, foram usados dados entre 1988 e 2019, de precipitação total do produto CHIRPS, temperatura média do ar, umidade relativa média do ar e radiação média solar da reanálise ERA5, respectivamente, para sete municípios da região de estudo. Quanto à estratégia metodológica, empregou-se testes de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen, com a finalidade de identificar variações significativas que possam impactar a produção canavieira dos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Foram considerados como referência para os testes de tendência os quatro trimestres anuais entre 1988 e 2019 (jan-mar, abr-jun, jul-set e out-dez), além do período chuvoso (out-mar); do período seco (abr-set); e o total anual. Os resultados identificaram, no geral, tendência significativa de redução da precipitação para o trimestre out-dez, considerado o período de desenvolvimento da cana-de-açúcar; para o período chuvoso; e para o total anual de todos os municípios. Para a temperatura do ar, todos os trimestres; período seco; chuvoso; e o total anual, apresentaram tendência significativa de aumento. Já para a umidade relativa do ar, os resultados evidenciaram tendência significativa de diminuição para os trimestres jan-mar, abr-jun, jul-set, período seco, chuvoso e o total anual. No que diz respeito à radiação solar, o trimestre jul-set, período seco e total anual apresentaram tendências estatisticamente significativas de aumento, porém baixas, para todos os municípios. Em suma, pode-se observar que, entre 1988 e 2019, há presença de tendência de crescimento nos municípios produtores de cana de açúcar do Triângulo e Alto

Paranaíba de Minas Gerais, para a temperatura. Por outro lado, há tendência de diminuição na umidade relativa do ar e precipitação.

Palavras-chave: *Saccharum spp*; Tendência; Precipitação; Temperatura; Umidade relativa; Radiação Solar.

Analysis of climate trends on sugarcane cultivation in the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba

Abstract: The climate is a fundamental factor in the cultivation of sugarcane, regardless of technological advances, providing limitations and adaptations for the sugarcane crop. Therefore, statistical tests to identify historical climate trends can help in monitoring and optimizing crop production and in mitigating and adapting plans for possible impacts caused by climate change. In this sense, the present study aims to characterize and analyze the trend component of climatic elements directly related to sugarcane production in the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. For this, data between 1988 and 2019 were used, total precipitation of the CHIRPS product, average air temperature, average relative humidity and average solar radiation from the ERA5 reanalysis, respectively, for seven municipalities in the study region. As for the methodological strategy, Mann-Kendall and Sem's Curvature trend tests were used, in order to identify significant variations that could impact sugarcane production in the municipalities of Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. The four annual quarters between 1988 and 2019 (Jan-Mar, Apr-Jun, Jul-Sep and Oct-Dec) were considered as a reference for the trend tests, in addition to the rainy season (Oct-Mar); the dry period (Apr-Sep); and the annual total. The results identified, in general, a significant tendency of precipitation reduction for the Oct-Dec quarter, considering the sugarcane development period; for the rainy season; and for the annual total of all municipalities. For air temperature, every quarter; dry season; rainy; and the annual total, showed a significant upward trend. As for relative air humidity, the results showed a significant downward trend for the quarters Jan-Mar, Apr-Jun, Jul-Sep, dry and rainy seasons and the annual total. With regard to solar radiation, the July-September quarter, dry period and annual total showed statistically significant trends of increase, however low, for all municipalities. In short, it can be observed that, between 1988 and 2019, there is a growth trend in the sugarcane producing municipalities of the Triângulo and Alto Paranaíba de Minas Gerais, for temperature. On the other hand, there is a tendency to decrease in relative humidity and precipitation.

Key-words: *Saccharum spp*; Trend; Precipitation; Temperature; Relative Humidity; Solar Radiation.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente estudo é caracterizar os elementos climáticos diretamente relacionados com a produção canavieira do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, entre 1989 e 2019. Os elementos analisados foram: (i) umidade relativa média do ar; (ii) precipitação total; (iii) temperatura média do ar; e (iv) radiação solar. As séries temporais de cada um destes elementos foi submetida aos testes tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen, com a finalidade de identificar comportamentos nas séries temporais que possam impactar a produção de canavieira.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, com 40% da produção mundial (FAO, 2020). Somente na safra de 2021/2022 foram produzidas mais de 560 milhões de toneladas. Desse total, o estado de Minas Gerais (MG) produziu 65 milhões de toneladas, com destaque para a região do Triângulo Mineiro (Conab, 2021). Esta é a região com o maior número de usinas sucroalcooleiras em MG.

Isso se deve à altos investimentos feitos na região nas últimas décadas, principalmente no âmbito agrônomo. Inovações e aplicação de técnicas agrônomicas foram responsáveis, por exemplo, por mitigar a baixa fertilidade natural dos solos da região. Além disso, em termos logísticos, esta região se destaca pelas vastas áreas de relevo plano, que podem ser mecanizadas, e proximidade com grandes centros de consumo e exportação (Santos, 2019; Peres & Previtali, 2021). Nesse contexto, alguns trabalhos abordaram aspectos sociais e técnicos do avanço da cultura da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro.

Brito & Reis (2012) mapearam as áreas outrora ocupadas por cobertura vegetal natural, pastagens, silvicultura ou agricultura, e que foram convertidas em áreas de plantio de cana. Com isso, identificaram as áreas de expansão no período de 1999 a 2008, com aumento de mais de 100% das áreas plantadas com cana-de-açúcar nesse período. Esse aumento de área veio acompanhado do uso de recursos naturais, como a água para irrigação.

Peres & Previtali (2021) estudaram os impactos ambientais e sociais do agronegócio sucroalcooleiro na região do Triângulo Mineiro a partir dos anos 2000. Esse estudo concluiu que a atividade das empresas deste setor tem causado a degradação ambiental da região. Já Ferreira et al (2018) estudaram a área irrigada por pivô central no Triângulo Mineiro. Estes autores consideraram a fotointerpretação

em imagens satélite para identificação do equipamento de irrigação e obtenção de sua área de ocupação. Assim, identificaram as regiões preferenciais do Triângulo Mineiro no uso estratégico dos recursos hídricos.

O uso estratégico de recursos hídricos é essencial para essa região. Isso porque o regime de chuvas anual é mal distribuído, com uma duração média de 175 dias da estação seca (abril a setembro/outubro) e 190 dias da estação chuvosa (setembro/outubro a abril). Assim, alguns trabalhos foram desenvolvidos na tentativa de entender o comportamento das series temporais de precipitação e temperatura para a região (Roldão & Assunção, 2012; Novais et al., 2018, Costa & Queiroz, 2021). Entretanto, estes trabalhos focaram na descrição das séries.

Nesse contexto, o presente trabalho se difere dos outros por usar análises de tendência, para fins de caracterização climática, com vista na produção canavieira. Isso é relevante, principalmente, no contexto de mudanças climáticas, no qual recursos fundamentais para a produção canavieira podem sofrer alteração na disponibilidade. Assim, nossos resultados podem fornecer evidências para criação de um calendário agrícola que leve em conta essa dinâmica climática, a fim de otimizar o uso de recursos naturais. Tal otimização significaria que menos insumos seriam usados na produção da cana-de-açúcar e, por consequência, uma agricultura mais sustentável.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e obtenção dos dados

Os dados utilizados nesse trabalho são provenientes dos municípios de Campo Florido, Conceição de Alagoas, Frutal, Iturama, Pirajuba, Santa Juliana, Santa Vitória e Uberaba; todos situados na região do Triângulo Mineiro. Esta região fica a noroeste do estado de Minas (Figura 1) e seus municípios foram escolhidos pela importância na produção canavieira local, produção esta que pode ser afetada por mudanças climáticas.

A dinâmica climática desta região é influenciada por diferentes agentes naturais, que controlam os elementos e fatores climáticos, resultando nos tipos climáticos. Todavia, as normais climatológicas evidenciam que o Triângulo

Mineiro/Alto Paranaíba possui clima tropical, com inverno seco e frio, e verão quente e chuvoso (DE SOUZA & CLEPS JUNIOR, 2009; REBOITA et al., 2015).

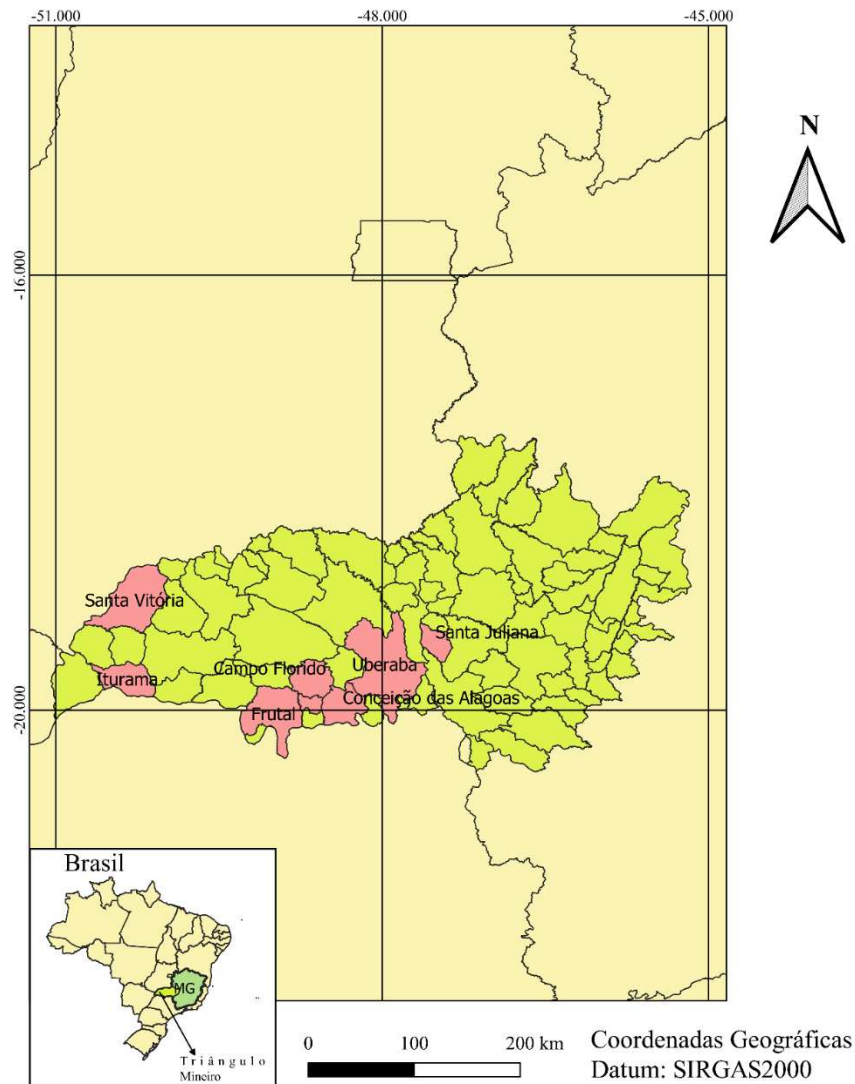


Figura 1: Localização do Triângulo Mineiro, destacando os municípios estudados. Fonte: Autor.

Uma normal climatológica refere-se ao valor médio de determinado elemento climático (temperatura do ar, precipitação, umidade relativa, radiação solar, etc.) em um período de, no mínimo, 30 anos. Esta média representa o valor predominante daquele elemento no local considerado. As normais utilizadas neste trabalho se referem ao período de 1988 a 2019. A variável precipitação pluviométrica foi extraída do produto de satélite *Climate Hazard Group Infra Red Precipitation with Station* (CHIRPS), já as variáveis temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar foram obtidas da reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5) (STÜKER et al., 2016; LIMBERGER; SILVA, 2018).

Inicialmente, os dados estavam em *time step* diário. Dessa forma, com o auxílio do *software Climate Data Operator* (CDO) foram feitas as operações de média anual, filtragem temporal e média de temperaturas. Essas operações foram feitas para se obter as variáveis: umidade relativa (UR), temperatura média do ar (T) e precipitação (P); em *time step* anual, no período de 1988 a 2019 (31 anos).

2.2 Análise de tendências estatísticas

O teste de Mann-Kendall, estabelecido por Mann (1945) e alterado por Kendall (1975), possibilita identificar a tendência estatística em uma série temporal. Considerando uma série (X_1, X_2, \dots, X_n) , procedente de uma amostra de n variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid), a estatística do teste de Mann-Kendall é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{ sinal } (X_j - X_i) \quad (1)$$

tal que, X_i são os valores da série de tempo nos anos i e j , e n é o número de elementos da série. O termo $\text{ sinal } (X_j - X_i)$ é obtido por:

$$\text{ sinal } (X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A variância de S , representada por $\text{VAR } (S)$ é definida pela seguinte equação:

$$\text{VAR } (S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

Considerando que tenha repetição de dados na série histórica, $\text{VAR } (S)$ é calculada pela seguinte equação:

$$\text{VAR } (S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (4)$$

em que t_p é o tamanho da série temporal. Logo, a estatística Z do teste estatístico de Mann Kendall é dado pela seguinte equação:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var } (S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var } (S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

O valor Z determina a existência de tendência estatisticamente significativa na série temporal. Sendo assim, para verificar qualquer tendência em nível de significância, a hipótese nula é aceita se Z for menor que $Z_{1-p/2}$. Caso $Z > 0$, temos

uma tendência crescente, por outro lado, se $Z < 0$, o teste de Mann-Kendall afirma que existe uma tendência decrescente. Por fim, caso o valor de $Z = 0$, temos a inexistência de tendência.

O teste de Mann-Kendall apresenta uma grande eficiência, porém o mesmo não fornece a magnitude das tendências detectadas. Para tanto, utiliza-se o estimador de declive proposto por Sen (1968). Conforme Portela et al. (2011) e Tao et al. (2014), o estimador de declive é obtido por meio da estatística Q , dado por:

$$Q_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (6)$$

tal que, X_i e X_j são valores da variável em estudo nos anos i e j . O valor positivo ou negativo para Q mostra tendências crescentes ou decrescentes, respectivamente. Caso na série analisada tenha n valores, então o número de pares estimados de Q é dado por $N = n(n - 1)/2$. E o estimador de declive de Sen é a mediana dos N valores de Q_{ij} (SEN,1968). Sendo assim, foi aplicado o teste de Mann-Kendall, e posteriormente foi encontrado o estimador de declive, com objetivo de detectar e estimar tendências nas séries de dados temporais proposto no estudo.

Foram testadas as tendências para as variáveis climáticas precipitação total do produto CHIRPS, temperatura média do ar, umidade relativa média do ar e radiação média solar da reanálise ERA5, para a amostra dos sete municípios da região de estudo, no período entre 1988 e 2019. Como referência para os testes de tendência, utilizaram-se os quatro trimestres anuais entre 1988 e 2019 (jan-mar, abr-jun, jul-set e out-dez), além do período chuvoso (out-mar); do período seco (abr-set); e o total anual. Os testes foram feitos pelo software *RStudio*, com os pacotes “*readxl*”; “*trend*” e “*mblm*”.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico está dividido em seis subtópicos. No 3.1 se apresenta uma análise sobre a média das variáveis climáticas precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar, sob distintas combinações temporais. Já, nos subtópicos 3.2 a 3.5, realiza-se análises de tendência para as referidas variáveis e, no 3.6, a mesma

análise é feita para as variáveis de área colhida, produção e produtividade da cana-de-açúcar na região de estudo, entre 1988 e 2019.

3.1 Análise das médias temporais das variáveis climáticas

A dinâmica climática influencia e é influenciada por distintos agentes naturais, sendo moderada por elementos e fatores climáticos que distinguem o tipo climático de um lugar de outro. Incluído nessas condições, o Estado de Minas Gerais apresenta grande complexidade climática, devido aos diversos fatores existentes em toda sua extensão. A região Norte é caracterizada com clima seco e quente, na qual, parte da região é integrante do Polígono das Secas. Na região Sul, devido à topografia, as chuvas são melhores distribuídas ao longo do ano. Por outro lado, a região Leste, sofre influências dos oceanos, devido sua proximidade com a região costeira, sendo eles, estado do Espírito Santo e o do Rio de Janeiro. Já a região Oeste, conhecida também como Triângulo Mineiro, possui condições de clima tropical, com inverno seco e frio, e verão quente e chuvoso (DE SOUZA & CLEPS JUNIOR, 2009; REBOITA et al., 2015).

No presente trabalho são caracterizados os elementos climáticos diretamente relacionados com a produção e a produtividade canavieira do Triângulo Mineiro, considerando os municípios que mais produzem na região (IBGE, 2021). Na Tabela 1 é apresentado os valores médios trimestrais (OND: outubro-dezembro; JFM: janeiro-março; AMJ: abril-junho; JAS: julho-setembro), período seco (abril a setembro); período chuvoso (outubro a março) e o total anual, dos parâmetros analisados para os oitos municípios do Triângulo Mineiro, com objetivo de analisar se o clima é favorável à produção e produtividade da cana-de-açúcar nos municípios estudados.

Antes de analisar as médias das variáveis climáticas, é importante destacar que a data de plantio da cultura dos municípios em estudo ocorre entre os meses de março e maio, e a colheita (entre abril e junho do ano seguinte na região). Com os estágios fenológicos da planta, tem-se que o período de desenvolvimento da cultura está entre os meses de outubro- dezembro e o de maturação entre janeiro-março.

Tabela 1: Valores médios trimestrais das variáveis climáticas para os trimestres, período seco, período chuvoso e anual, 1988 a 2019.

	Município	OND	JFM	AMJ	JAS	PERÍODO SECO	PERÍODO CHUVOSO	ANUAL
Precipitação (mm)	Campo Florido	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Conceição das Alagoas	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Frutal	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Iturama	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Pirajuba	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Santa Juliana	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Santa Vitória	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
	Uberaba	95.10	135.60	150.50	74.30	224.80	230.60	1214.50
Temperatura (°C)	Campo Florido	24.88	24.60	22.12	22.96	22.54	24.74	23.64
	Conceição das Alagoas	25.64	25.43	22.72	23.32	23.02	25.53	24.28
	Frutal	25.65	25.37	22.71	23.47	23.09	25.51	24.30
	Iturama	26.30	25.98	23.28	23.97	23.63	26.12	24.88
	Pirajuba	25.58	25.34	22.63	23.31	22.97	25.46	24.22
	Santa Juliana	22.82	22.93	20.26	20.33	20.29	22.88	21.59
	Santa Vitória	26.60	26.10	23.88	24.66	24.27	26.35	25.31
	Uberaba	24.28	24.09	21.63	22.44	22.04	24.18	23.11
Umidade (%)	Campo Florido	69.83	76.87	65.77	50.07	57.92	73.35	65.63
	Conceição das Alagoas	68.81	76.45	66.32	51.11	58.71	72.63	68.81
	Frutal	70.59	78.23	67.91	51.85	59.88	74.41	67.14
	Iturama	71.64	78.91	68.95	52.84	60.90	75.27	71.64
	Pirajuba	69.82	77.30	67.12	51.64	59.38	73.56	69.82
	Santa Juliana	72.89	77.34	69.08	55.79	62.43	75.11	68.77

Notas: i) OND se refere ao trimestre outubro-dezembro; JFM a janeiro-março; AMJ a abril-junho; JAS a julho-setembro), período seco (abril a setembro); período chuvoso (outubro a março) e o total anual;

	Santa Vitória	69.01	76.67	64.35	48.30	56.33	72.84	64.58
	Uberaba	70.15	76.17	65.95	50.71	58.33	73.16	65.75
Radiação Solar (MJ/m²)	Campo Florido	29.20	28.33	19.00	20.57	19.79	28.76	24.28
	Conceição das Alagoas	29.00	28.23	18.85	20.43	19.64	28.68	24.16
	Frutal	29.12	28.21	18.82	20.38	19.60	28.66	24.13
	Iturama	29.13	28.13	18.82	20.31	19.56	28.57	24.06
	Pirajuba	29.13	28.23	18.84	20.41	19.62	28.68	24.15
	Santa Juliana	28.94	28.20	19.18	20.61	19.89	28.57	24.23
	Santa Vitória	29.50	28.70	19.47	21.05	20.26	29.10	24.68
	Uberaba	29.29	28.42	19.09	20.68	19.88	28.86	24.37

ii) por inexistência de informações desagregadas, os dados de precipitação foram considerados os mesmos para os municípios.

Iniciando-se com precipitação anual, observa-se que seus valores médios estão dentro da faixa (1214.5 mm) para os oitos municípios. Dessa forma, pode-se dizer que o nível de precipitação da região tem sido favorável à produção da cana-de-açúcar, uma vez que as necessidades hídricas desta cultura variam entre 1100 e 1500 mm/anual (INMAN-BAMBER et al., 2008; VERHEYE, 2010; NETAFIM, 2020).

Ainda, vale lembrar que a precipitação é um elemento do clima que pode alterar a disponibilidade de água, essencial à produção da cana-de-açúcar. A falta de precipitação, na forma de estiagem ou seca, pode reduzir a produtividade da cana-de-açúcar, especialmente em regiões tropicais, semiáridas e áridas do mundo. Assim, o déficit hídrico afeta negativamente o crescimento e desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar, sendo a principal razão da diminuição da produtividade (INMAN-BAMBER et al., 2008).

Quanto à temperatura, percebe-se que seus valores médios para os oitos municípios estão dentro da faixa ideal para o desenvolvimento da cultura (OND: 25.58 a 26.3 °C), uma vez que, os valores encontrados no trimestre OND são semelhantes. Por outro lado, os valores de temperatura do ar referente ao trimestre AMJ estão levemente acima da faixa ideal do estágio de maturação (22.63°C a 23.58°C), o desejável é que sejam aproximadamente a 21°C. Analisar esse comportamento é importante, uma vez que todas as células da cana respondem ao estresse causado

por altas temperaturas. Essa resposta se dá de maneira significativa quando a temperatura aumenta de forma rápida e abrupta, geralmente de 5 a 10°C acima das temperaturas consideradas normais (NETAFIM, 2020).

Além disso, a temperatura do ar é o elemento do clima que pode alterar a velocidade de reações essenciais à fisiologia e à produção da cana-de-açúcar, como a própria fotossíntese. Altas ou baixas temperaturas causam estresses, que têm potencial de prejudicar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Isso, porque essa planta é considerada de clima tropical, de modo que durante o estágio de desenvolvimento da cultura é desejável que a temperatura do ar varie entre 25°C e 35°C e, durante o estágio de maturação, que as temperaturas sejam aproximadamente 21°C. Assim, há redução da taxa de alongamento dos colmos e promoção do acúmulo de sacarose (MAGALHÃES, 1987; ALVES; MARENGO, 2010; DAYANA, 2015; MANHÃES et al., 2015; NETAFIM, 2020).

Em termos de umidade relativa do ar, observa-se que as médias não se diferenciam muito entre os municípios, além de, como esperado, serem maiores para o período chuvoso e menores para o seco. Conforme Dayana (2015), durante o crescimento da cultura é desejável que a umidade relativa do ar (UR %) esteja entre 80% e 85%, já no estado de maturação/colheita entre 45% e 65%. Ressalta-se que valores elevados de umidade do ar afeta o crescimento da cana-de-açúcar e pode contribuir para o surgimento de doenças fúngicas. Já, a ausência, acarreta a morte da planta (DAYANA, 2015; NETAFIM, 2020).

Por fim, quanto à radiação solar, observa-se pouca variação entre os municípios e maiores médias (valores em torno de MJ/m²) para o trimestre out-dez, que é o período de desenvolvimento da cana. Este resultado aponta que a região em estudo tem apresentado nível de radiação positivo para o cultivo da cana-de-açúcar, uma vez que o mesmo é influenciado pela luz solar, sendo que no período de crescimento da planta é necessário que a cultura receba energia solar entre 18 e 36 MJ/m² (NETAFIM, 2020).

3.1 Tendências nas séries históricas de precipitação

Com o intuito de averiguar a existência de tendência nas séries históricas, foram aplicados os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Declive de Sen, cujas hipóteses nulas são a ausência de tendência. Para um intervalo de 31 anos,

correspondendo ao período de 1988 a 2019, foram considerados os totais anuais de precipitação (Anual), os totais trimestrais de cada ano (out-dez - OND; jan-mar - JFM; abr-jun - AMJ, jul-set - JAS) e as precipitações acumuladas nos períodos chuvosos (precipitações entre os meses de outubro e março) e períodos secos (abril a setembro). Ressalta-se que foi assumido a precipitação constante entre os municípios do Triângulo Mineiro em razão do ponto de grade ser o mesmo para todos e, por isso, os testes foram feitos considerando os municípios em agregado.

Na Tabela 2 pode ser observado os resultados referentes a estes testes para a variável precipitação. Pelo teste de Mann-Kendall, observa-se que em todos os municípios ocorreu tendências significativas para as séries históricas dos períodos OND (-0,27), período chuvoso (-0.21) e o anual (-0.22), sendo que nos três casos os testes de tendência apontaram que as ocorrências de chuva estão decaindo (tendência negativa, $p < 0.05$ e $p < 0.10$) com o passar dos anos. Especial destaque faz-se para o trimestre OND, que compreende o período de desenvolvimento da cana-de-açúcar, que ao longo dos anos tem apresentado tendência de queda da precipitação média. Em contrapartida, os dados apresentados pelos períodos JFM, AMJ, JAS e Período Seco não acusaram tendência significativa, seja de redução ou de aumento.

Tabela 2: Tendências de precipitação total, 1988 a 2019.

Testes Não-Paramétricos				
Mann-Kendall				Curvatura de Sen
Séries Históricas	Kendall's Tau	p-value	Sig. Estat.	Sem's Slope (mm/ano)
JFM	-0.048	0.709	NS	-0.014
AMJ	-0.077	0.549	NS	-0.032
JAS	-0.069	0.593	NS	-0.080
OND	-0.270	0.031**	S-	-0.071
Período Seco	-0.048	0.709	NS	-0.021
Período Chuvoso	-0.210	0.094*	S-	-0.041
Anual	-0.218	0.083*	S-	-0.029

Legenda: ** p -value < 0.05; * p -value < 0.10; NS = Nenhuma significância estatística; S-: Tendência significativa negativa. **OND**: período de desenvolvimento da cana e **AMJ**: período de maturação/colheita. Kendall's Tau: indica o quão fortemente duas variáveis estão relacionadas.

O resultado da Curvatura de Sen para o período OND foi de -0.071 mm/ano. Para os períodos chuvoso e anual, os resultados da Curvatura de Sen foram de -0.041 mm/ano e -0.029 mm/ano, respectivamente. Esses resultados indicam que a maior tendência de queda acontece no período OND. Dessa maneira, dada a importância da precipitação para a produção de cana-de-açúcar, sobretudo no período de plantio (jan-mar) e maturação (abr-jun), os produtores devem utilizar de técnicas alternativas para manter ou mesmo aumentar a produção. Ademais, conforme Wilhite (2000), a seca meteorológica ocorre quando há um desvio negativo nos valores de precipitação, mesmo que na maioria dos resultados não sejam estatisticamente significativas, provocam uma redução de chuva que podem, posteriormente, contribuir com a ocorrência de secas agrícolas.

3.2 Tendências nas séries históricas da temperatura do ar

Na Tabela 3 tem-se os resultados dos testes de tendência executadas nas séries históricas de temperatura do ar para os municípios produtores de cana-de-açúcar do Triângulo Mineiro. Conforme os resultados dos testes, observa-se que para o teste de Mann-Kendall as séries históricas apresentaram tendências com significância estatística de aumento de temperatura (tendência positiva) em quase todas as variações temporais e para todos os municípios do Triângulo Mineiro ($p < 0.05$ e $p < 0.10$). A exceção é o trimestre OND do município de Santa Vitória ($p = 0.189$).

As séries históricas da temperatura do ar de JFM, AMJ, JAS, OND, período seco, período chuvoso e total anual para todas as séries históricas dos municípios levantados no estudo apresentaram um *kendall's tau* entre 0,1653 a 0,5040.

Tabela 3: Tendências de temperatura (°C) trimestrais (JFM; AMJ; JAS e OND), período seco (abril a setembro), período chuvoso (outubro a março), média mensal e total anual, 1988 a 2019.

Teste Não-Paramétricos					
Mann-Kendall					Curvatura de Sen
Séries Históricas	Municípios	<i>Kendall's Tau</i>	<i>p-value</i>	Sig. Estat.	<i>Sem's Slope</i>
	Campo Florido	0.3266	0.0090**	S+	9.985
	Conceição das Alagoas	0.3387	0.0068**	S+	9.848

JFM	Frutal	0.3669	0.0033**	S+	10.590
	Iturama	0.3387	0.0068**	S+	11.550
	Pirajuba	0.3548	0.0045**	S+	10.060
	Santa Juliana	0.2621	0.0365**	S+	8.774
	Santa Vitória	0.3266	0.0090**	S+	11.130
AMJ	Campo Florido	0.4073	0.0011**	S+	10.230
	Conceição das Alagoas	0.4194	0.0008**	S+	10.560
	Frutal	0.4113	0.0009**	S+	9.838
	Iturama	0.3952	0.0016**	S+	9.467
	Pirajuba	0.4113	0.0009**	S+	10.370
	Santa Juliana	0.250	0.0461**	S+	8.464
	Santa Vitória	0.3831	0.0022**	S+	10.220
JAS	Campo Florido	0.3589	0.0041**	S+	7.536
	Conceição das Alagoas	0.3548	0.0045**	S+	8.288
	Frutal	0.3589	0.0041**	S+	7.606
	Iturama	0.3589	0.0041**	S+	6.827
	Pirajuba	0.3548	0.0045**	S+	7.736
	Santa Juliana	0.4113	0.0009**	S+	10.35
	Santa Vitória	0.3669	0.0033**	S+	7.132
OND	Campo Florido	0.2823	0.0242**	S+	7.053
	Conceição das Alagoas	0.3185	0.0109**	S+	7.689
	Frutal	0.2742	0.0286**	S+	6.524
	Iturama	0.2298	0.0669*	S+	6.277
	Pirajuba	0.2983	0.0171**	S+	7.041
	Santa Juliana	0.2903	0.0204**	S+	7.260
	Santa Vitória	0.1653	0.1890	NS	4.344
Período Seco	Campo Florido	0.4395	0.0004**	S+	12.550
	Conceição das Alagoas	0.5040	0.0000**	S+	15.200
	Frutal	0.4718	0.0002**	S+	13.090
	Iturama	0.4945	0.0000**	S+	12.950
	Pirajuba	0.4718	0.0002**	S+	13.920

	Santa Juliana	0.4476	0.0003**	S+	14.940
	Santa Vitória	0.4355	0.0005**	S+	10.980
Período Chuvoso	Campo Florido	0.3629	0.0037**	S+	12.410
	Conceição das Alagoas	0.3710	0.0030**	S+	12.750
	Frutal	0.3750	0.0027**	S+	12.220
	Iturama	0.3508	0.0050**	S+	11.870
	Pirajuba	0.3911	0.0017**	S+	12.700
	Santa Juliana	0.3306	0.0082**	S+	11.680
	Santa Vitória	0.3491	0.0053**	S+	12.600
Anual	Campo Florido	0.4718	0.0002**	S+	16.770
	Conceição das Alagoas	0.5000	0.0000**	S+	17.630
	Frutal	0.4798	0.0001**	S+	15.600
	Iturama	0.4798	0.0001**	S+	14.980
	Pirajuba	0.4798	0.0001**	S+	16.840
	Santa Juliana	0.4476	0.0003**	S+	17.260
	Santa Vitória	0.4194	0.0008**	S+	14.150

Legenda: ***p-value* < 0.05; **p-value* < 0.10; NS = Nenhuma significância estatística; S-: Tendência significativa negativa; S+: Tendência significativa positiva. **OND**: período de desenvolvimento da cana e **AMJ**: período de maturação/colheita. Kendall's Tau: indica o quão fortemente duas variáveis estão relacionadas.

Em testes com resultados semelhantes, Sanches et al. (2017) e De Almeida et al (2020) encontraram tendência de aumento anual de temperatura para estações meteorológicas de Minas Gerais, incluindo quatro estações do Triângulo Mineiro (Araxá, Capinópolis, Uberaba e Patos de Minas). Todavia, conforme salienta Alves e Marengo (2010), o aumento da temperatura contribui para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Isso ocorre, sobretudo, se acompanhada pelo aumento da umidade e, conseqüentemente, da fotossíntese líquida.

Quanto ao tamanho da tendência, o resultado da Curvatura de Sen para o trimestre JFM variou entre 8.77 °C/ano a 11.55 °C/ano, para os municípios com maior produção de cana-de-açúcar, que são Frutal, Conceição das Alagoas e Iturama. Para o trimestre AMJ (período de maturação e colheita), a declividade apontou variação entre 8.46 °C/ano a 10.56 °C/ano.

3.3 Tendências nas séries históricas da umidade relativa

Pela Tabela 4 pode-se observar os resultados obtidos no teste de Mann-Kendall e curvatura de Sen para as séries da umidade relativa. No geral, foi possível observar que as tendências para umidade relativa foi de decréscimo significativo ($p < 0.05$ e $p < 0.10$) para os trimestres JFM, AMJ, JAS, o período seco e chuvoso e o total anual, de todos os municípios do Triângulo Mineiro. Isso indica redução da porcentagem média de nebulosidade no céu.

Tabela 4: Tendências de umidade relativa (%) trimestrais (JFM; AMJ; JAS e OND), período seco (abril a setembro), período chuvoso (outubro a março), média mensal e total anual, 1988 a 2019.

Teste Não-Paramétricos					
Mann-Kendall					Curvatura de Sen
Séries Históricas	Municípios	Kendall's Tau	p-value	Sig. Estat.	Sem's Slope
JFM	Campo Florido	-0.3266	0.0090**	S-	-1.846
	Conceição das Alagoas	-0.3427	0.0061**	S-	-1.933
	Frutal	-0.3629	0.0037**	S-	-2.095
	Iturama	-0.3629	0.0037**	S-	-2.361
	Pirajuba	-0.3548	0.0045**	S-	-2.014
	Santa Juliana	-0.2742	0.0286**	S-	-1.451
	Santa Vitória	-0.3790	0.0024**	S-	-2.200
AMJ	Campo Florido	-0.2298	0.0669*	S-	-0.7886
	Conceição das Alagoas	-0.2500	0.0461**	S-	-0.9095
	Frutal	-0.2379	0.0578**	S-	-0.8144
	Iturama	-0.2782	0.0263**	S-	-0.9085
	Pirajuba	-0.2540	0.0427**	S-	-0.8904
	Santa Juliana	-0.1209	0.3387	NS	-0.556
	Santa Vitória	-0.3024	0.0157**	S-	-1.107
	Campo Florido	-0.2742	0.0286**	S-	-0.7923
	Conceição das Alagoas	-0.2581	0.0394**	S-	-0.8091
	Frutal	-0.2258	0.0719*	S-	-0.6761
	Iturama	-0.2540	0.0427**	S-	-0.7243

JAS	Pirajuba	-0.2298	0.0669*	S-	-0.7074
	Santa Juliana	-0.3508	0.0050**	S-	-1.123
	Santa Vitória	-0.3226	0.0099**	S-	-0.8049
OND	Campo Florido	-0.1331	0.2919	NS	-0.6023
	Conceição das Alagoas	-0.1613	0.2002	NS	-0.7571
	Frutal	-0.1331	0.2919	NS	-0.5824
	Iturama	-0.1089	0.3901	NS	-0.5681
	Pirajuba	-0.1411	0.2632	NS	-0.6348
	Santa Juliana	-0.2177	0.0827*	S-	-0.8698
	Santa Vitória	-0.1694	0.1783	NS	-0.814
Período Seco	Campo Florido	-0.3306	0.0082**	S-	-1.213
	Conceição das Alagoas	-0.3709	0.0030**	S-	-1.409
	Frutal	-0.3548	0.0045**	S-	-1.263
	Iturama	-0.3387	0.0068**	S-	-1.231
	Pirajuba	-0.3589	0.0041**	S-	-1.339
	Santa Juliana	-0.3347	0.0075**	S-	-1.583
	Santa Vitória	-0.3952	0.0016**	S-	-1.271
Período Chuvoso	Campo Florido	-0.2742	0.0286**	S-	-1.578
	Conceição das Alagoas	-0.3065	0.0143**	S-	-1.728
	Frutal	-0.2419	0.0536**	S-	-1.615
	Iturama	-0.2419	0.0536**	S-	-1.671
	Pirajuba	-0.3064	0.0143**	S-	-1.746
	Santa Juliana	-0.3024	0.0157**	S-	-1.785
	Santa Vitória	-0.2903	0.0204**	S-	-1.788
Anual	Campo Florido	-0.3992	0.0014**	S-	-2.171
	Conceição das Alagoas	-0.3911	0.0017**	S-	-2.165
	Frutal	-0.3790	0.0024**	S-	-2.099
	Iturama	-0.3669	0.0033**	S-	-1.899
	Pirajuba	-0.3952	0.00157**	S-	-2.166
	Santa Juliana	-0.4315	0.0005**	S-	-2.791
	Santa Vitória	-0.3871	0.0019**	S-	-1.972

Legenda: ***p-value* < 0.05; **p-value* < 0.10; NS = Nenhuma significância estatística; S-: Tendência significativa negativa; S+: Tendência significativa positiva. **OND**: período de desenvolvimento da cana e **AMJ**: período de maturação/colheita. Kendall's Tau: indica o quão fortemente duas variáveis estão relacionadas.

Por outro lado, para o trimestre OND não se observou tendência significativa para nenhum município, exceto o de Santa Juliana ($p < 0.10$). Por este ser o período de desenvolvimento da planta, pode-se entender que este resultado sinaliza que a tendência de queda da umidade pode não ter tido efeito tão grande no desenvolvimento das plantações cana.

Quanto aos resultados da Curvatura de Sem, tem-se que, entre 1988 e 2019, os trimestres JFM são aqueles com maior variação de queda na umidade relativa, entre -2.20 %/ano a -1.45 %/ano, em todos municípios. Por outro lado, a tendência de queda tem menor variação nos trimestres OND, sendo que para a maioria dos municípios essa variação não é significativa, conforme já verificado no teste de Mann-Kendall.

Conforme De Almeida et al (2020), que também encontraram uma tendência de queda de umidade relativa para todas as estações meteorológicas de Minas Gerais, salientam que quando a pressão de vapor de água é constante (ou não possui variação significativa), a temperatura se comporta como variável inversa da umidade relativa.

3.4 Tendências nas séries históricas da radiação solar

Em relação à radiação solar, encontram-se na Tabela 5 os resultados para os testes de tendência e para o tamanho da curvatura, para todos os períodos considerados e municípios da amostra. De modo geral, tem-se que as tendências para radiação solar foram de crescimento significativo ($p < 0.05$ e $p < 0.10$) para o trimestre JAS, o período seco e o total anual, de todos os municípios do Triângulo Mineiro.

Tabela 5: Tendências da radiação solar (MJ/m²), 1988 a 2019.

Teste Não-Paramétricos	
Mann-Kendall	Curvatura de Sen

Séries Históricas	Municípios	Kendall's Tau	p-value	Sig. Estat.	Sem's Slope
JFM	Campo Florido	0.1629	0.1878	NS	26.77
	Conceição das Alagoas	0.1288	0.2992	NS	20.93
	Frutal	0.1459	0.2389	NS	24.15
	Iturama	0.1667	0.1777	NS	28.45
	Pirajuba	0.1363	0.2713	NS	21.68
	Santa Juliana	0.1742	0.1585	NS	25.28
	Santa Vitória	0.1742	0.1585	NS	28.87
AMJ	Campo Florido	0.1326	0.285	NS	17.29
	Conceição das Alagoas	0.1288	0.2992	NS	17.36
	Frutal	0.1477	0.2328	NS	18.68
	Iturama	0.1477	0.2328	NS	18.46
	Pirajuba	0.1363	0.2713	NS	17.79
	Santa Juliana	9.09e-02	0.4665	NS	12.68
	Santa Vitória	0.1629	0.1878	NS	21.46
JAS	Campo Florido	0.2689	0.0289**	S+	27.62
	Conceição das Alagoas	0.2689	0.0289**	S+	27.71
	Frutal	0.2917	0.0178**	S+	29.15
	Iturama	0.2992	0.0149**	S+	29.5
	Pirajuba	0.2917	0.0178**	S+	29.01
	Santa Juliana	0.3106	0.0116**	S+	25.89
	Santa Vitória	0.3106	0.0116**	S+	28.49
OND	Campo Florido	0.1136	0.3606	NS	19.79
	Conceição das Alagoas	0.1060	0.3941	NS	18.33
	Frutal	7.58e-02	0.5457	NS	14.70
	Iturama	0.0719	0.5664	NS	11.95
	Pirajuba	8.33e-02	0.5052	NS	15.87
	Santa Juliana	0.1098	0.3771	NS	19.65
	Santa Vitória	0.1212	0.329	NS	19.53
	Campo Florido	0.2462	0.0456**	S+	39.91

Período Seco	Conceição das Alagoas	0.2462	0.0456**	S+	40.33
	Frutal	0.2576	0.0365**	S+	40.89
	Iturama	0.2992	0.0149**	S+	42.99
	Pirajuba	0.2386	0.0528**	S+	38.27
	Santa Juliana	0.2424	0.0491**	S+	38.55
	Santa Vitória	0.3106	0.0116**	S+	44.09
Período Chuvoso	Campo Florido	6.82e-02	0.5876	NS	15.79
	Conceição das Alagoas	6.06e-02	0.631	NS	15.61
	Frutal	8.15e-02	0.5151	NS	17.28
	Iturama	8.71e-02	0.4856	NS	18.09
	Pirajuba	6.43e-02	0.6091	NS	16.3
	Santa Juliana	6.06e-02	0.631	NS	13.9
	Santa Vitória	0.1156	0.3525	NS	22.77
Anual	Campo Florido	0.2386	0.0528**	S+	47.44
	Conceição das Alagoas	0.250	0.0424**	S+	48.27
	Frutal	0.2576	0.0365**	S+	47.05
	Iturama	0.2652	0.0313**	S+	46.18
	Pirajuba	0.2462	0.0456**	S+	45.66
	Santa Juliana	0.2083	0.0912*	S+	39.2
	Santa Vitória	0.2992	0.0149**	S+	52.9

Legenda: ***p-value* < 0.05; **p-value* < 0.10; NS = Nenhuma significância estatística; S-: Tendência significativa negativa; S+: Tendência significativa positiva. **OND**: período de desenvolvimento da cana e **AMJ**: período de maturação/colheita. Kendall's Tau: indica o quão fortemente duas variáveis estão relacionadas.

Por outro lado, os trimestres JFM, AMJ e OND e o período chuvoso não apresentaram tendência significativa para nenhum município. Em relação aos valores de *kendall's tau* apresentados na Tabela 5 para as tendências significativas, foi possível observar que os mesmos variam entre 0.2083 a 0.3106. Essa tendência positiva da radiação solar pode ter como causa com uma redução de nebulosidade, que também implica diretamente na redução de precipitação (observada na seção 3.1).

Quanto aos resultados da Curvatura de Sem, no período JAS houve crescimento médio na tendência entre 25.89 MJ/m².dia a 29.50 MJ/m².dia, para os municípios com maior produção de cana-de-açúcar, ou seja, Frutal, Conceição das Alagoas e Iturama . Para o período seco, observa-se variação entre 38.25 MJ/m².dia a 42.22 MJ/m².dia. Para o período total anual, a declividade variou entre 39.20 MJ/m².dia a 52.90 MJ/m².dia. De forma geral, estas variações são pequenas, conforme pôde ser visualizado na baixa variação da média apresentada na Tabela 1. Esse resultado é esperado, por esta se tratar de uma variável astronômica.

3.5 Tendências nas séries históricas da área colhida, produção e produtividade de cana-de-açúcar

Na Figura 2 é apresentada a área colhida (ha) da cana-de-açúcar nos municípios do Triângulo Mineiro (Campo Florido, Conceição das Alagoas, Frutal, Iturama, Pirajuba, Santa Juliana e Santa Vitória), para cada um dos anos de 2001 a 2019². Quanto mais escura a cor do preenchimento no mapa, maior a área colhida.

Neste período, é possível observar uma intensificação na área colhida do produto. Conforme Reis e Brito (2010) e Trevisan et al. (2019), o crescimento de cultivo de cana-de-açúcar nesta região está relacionado com o fato da mesma possuir clima propício para o cultivo da cultura, já que está inserida ao clima subtropical e tropical. Trevisan et al. (2019) relatam que o local onde as usinas se instalam acaba interferindo na ocupação dos campos vizinhos, fazendo com que a cultura local acabe se instalando em locais que não têm usinas. Entre todas as microrregiões do Triângulo Mineiro, o município de Frutal é a que possui maior concentração de plantação e produção da cana-de-açúcar, seguido de Iturama (Figura 2 e Figura 3).

Entre os anos de 1999 e 2008, a área destinada à plantação da cana-de-açúcar cresceu 119%, ocorrendo nas áreas de pastagem (70%) e da agricultura (28%). Sendo assim, é possível perceber que grandes partes das terras que antes eram utilizadas como pastagem e outros cultivos, atualmente são utilizadas para produção de cana-de-açúcar (REIS e BRITO, 2010).

² Período para o qual há disponibilidade de dados para a área plantada, produção e produtividade de cana-de-açúcar (IBGE).

Por outro lado, Alves et al. (2021) relatam que o crescimento da área colhida a partir de 2009 está associado ao aumento da frota nacional de veículos automotores com a tecnologia *flexfuel*, estimulando a reintegração de grandes projetos e investimentos no setor sucroalcooleiro. A produção de automóveis da categoria flex foi de 49 mil unidades em 2003, passando para 1,53 milhão em 2020, conforme a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2021).

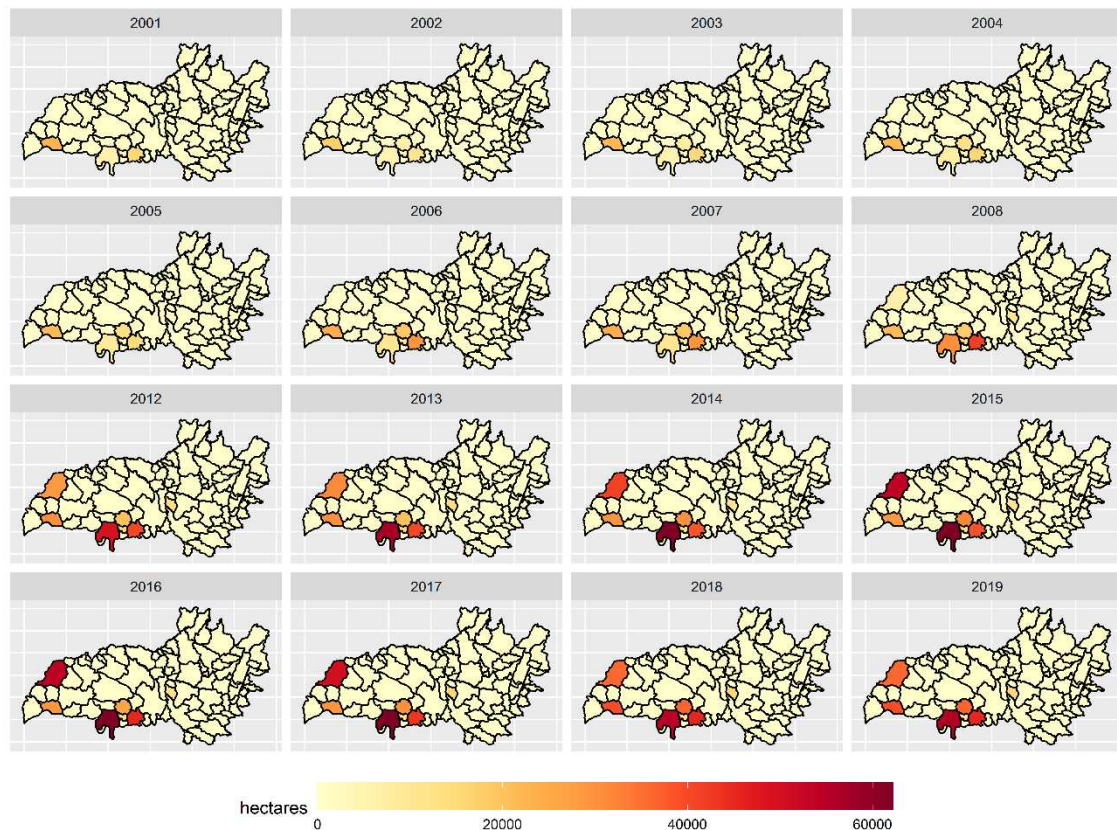


Figura 2: Área colhida (ha) da cana-de-açúcar nos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba entre os anos de 2001 a 2019.

De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP (2020), os fatores que afetam o comportamento das áreas plantadas são diversos, indo desde a continuidade ou não do empreendimento até o acesso a novas tecnologias, a reforma de lavouras, dentre outros. Dessa maneira, o incremento da tecnologia de veículos *flexfuel* aumentou a demanda pelo combustível derivado do processo da cana-de-açúcar, o etanol, motivando a produção da cultura de cana-de-açúcar, em especial nos estados de São Paulo, Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais entre os anos de 2000 e 2020.

No que se refere à produção de cana-de-açúcar no período de 2001 a 2019, pela Figura 3 identifica-se que houve uma tendência de crescimento significativo na produção de cana-de-açúcar em todos os municípios do Triângulo Mineiro. Isso pode ser visto pela a coloração verde nos mapas, que se intensificou ao longo do tempo. Os municípios que mais aumentaram a produção foram Frutal, Conceição das Alagoas e Iturama.

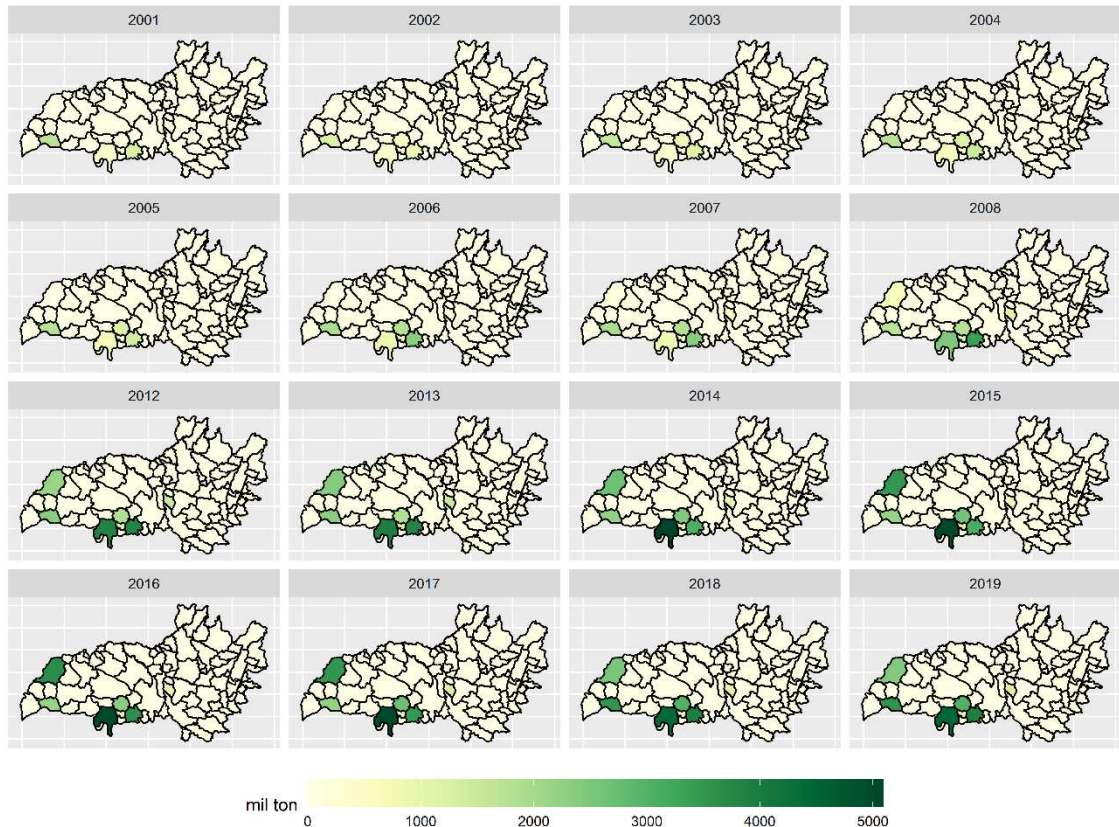


Figura 3: Produção (t) da cana-de-açúcar nos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba entre os anos de 2001 a 2019.

Analisando a produtividade da cana-de-açúcar no período de 2001 a 2019, pela Figura 4, observa-se que houve uma tendência de crescimento significativo na produtividade da cana-de-açúcar somente em Frutal e Pirajuba, podendo se confirmar pela coloração **azul** nos mapas, na qual se intensificou ao longo dos anos, ou seja, esses foram os únicos municípios que aumentaram a produtividade da cana.

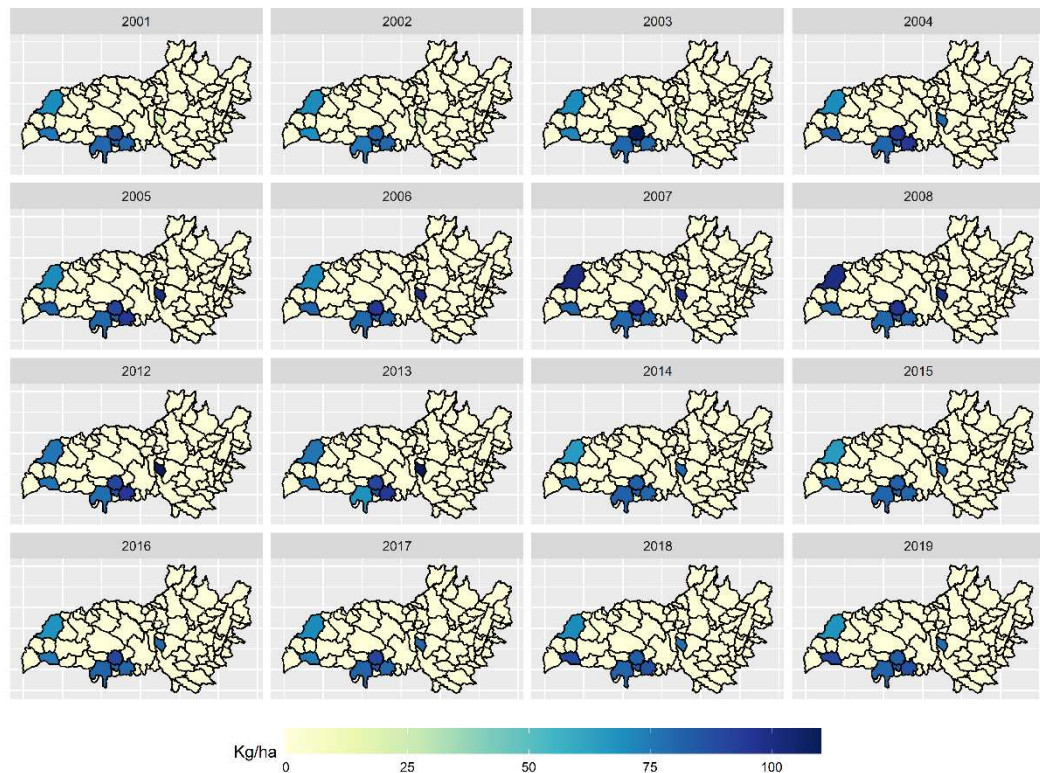


Figura 3: Produtividade (t/ha) da cana-de-açúcar nos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba entre os anos de 2001 a 2019.

Passando-se para as análises das tendências nas variáveis área colhida (ha), produção (t) e produtividade (t/ha) da cana-de-açúcar, na Tabela 7 encontram-se os resultados do teste de Mann-Kendall e o declive de Sen, nos anos de 2001 a 2019, para os municípios do Triângulo Mineiro. Pode-se observar, que as tendências para área colhida e produção da cana-de-açúcar são de crescimento para todos os municípios considerados neste estudo. Já para produtividade, houve tendência de crescimento somente para os municípios de Frutal e Pirajuba, os outros não apresentaram tendência significativa, seja de redução ou de aumento. Esses resultados corroboram com os de Silva et. al. (2019); Alves et. al. (2021); Tamborin e Santos (2021).

Tabela 7: Tendências da área colhida (há) e produção (t) da cana-de-açúcar, de 2001 a 2019.

Teste Não-Paramétricos					
Mann-Kendall					Curvatura de Sem
Séries Históricas	Municípios	Kendall's Tau	p-value	Sig. Estat.	Sem's Slope

Área Colhida (ha)	Campo Florido	0.8740	0.0080**	S+	0.0984
	Conceição das Alagoas	0.7406	0.0663*	S+	0.0832
	Frutal	0.7395	0.0585**	S+	0.0416
	Iturama	0.6214	0.0011**	S+	0.1508
	Pirajuba	0.4036	0.0369**	S+	0.0513
	Santa Juliana	0.7899	0.0183**	S+	0.0500
	Santa Vitória	0.6907	0.0003**	S+	0.0451
Produção (t)	Campo Florido	0.8908	0.0050**	S+	0.0168
	Conceição das Alagoas	0.7563	0.0400**	S+	0.0131
	Frutal	0.7731	0.0272**	S+	0.0072
	Iturama	0.7005	0.0002**	S+	0.0075
	Pirajuba	0.4304	0.0239**	S+	0.0086
	Santa Juliana	0.6555	0.0005**	S+	0.0076
	Santa Vitória	0.6963	0.0003**	S+	0.0092
Produtividade (t/ha)	Campo Florido	-0.2164	0.2267	NS	-0.2703
	Conceição das Alagoas	0.0889	0.6528	NS	0.15
	Frutal	0.4309	0.0183**	S+	3.282
	Iturama	-0.0430	0.8315	NS	-0.6035
	Pirajuba	0.4344	0.0208**	S+	2.00
	Santa Juliana	0.0525	0.7984	NS	0.0375
	Santa Vitória	-0.2156	0.241	NS	-0.25

Legenda: ***p-value* < 0.05; **p-value* < 0.10; NS = Nenhuma significância estatística; S-: Tendência significativa negativa; S+: Tendência significativa positiva.

Enfim, o crescimento da cultura da cana-de-açúcar na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba tem ocorrido, com destaque de aumento na área colhida de Iturama e Campo florido, bem como na produção em Santa Vitória e Pirajuba. Em complemento à reflexão de Tamborin e Santos (2021), apesar das variáveis climáticas terem influência, pode-se dizer que há diversos incentivos econômicos, políticos e parcerias público-privados, que junto com a qualidade, tanto do solo quanto do clima, permitiram que a região de estudo se tornasse grande produtora da cultura de cana-de-açúcar.

4. CONCLUSÕES

A análise de tendências executada através da realização dos testes estatísticos de Mann-Kendall e Sen para os parâmetros considerados possibilitou concluir que a precipitação total apresentou tendências significativas de redução para os municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba para o trimestre OND, o período chuvoso e total anual. Desta forma, a utilização da irrigação na cultura de canavieira pode suprir um déficit hídrico, implicando no equilíbrio da produção dessa cultura e colaborando para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar.

Em relação à temperatura do ar, tem-se que a maioria dos resultados obtidos para o período analisado apresentaram tendências significativas crescentes para a maioria dos municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, no trimestre OND. Esse aumento de temperatura, por contribuir com a evapotranspiração, pode ter contribuído para o desenvolvimento da cana-de-açúcar e para o aumento da produtividade da cultura na região.

A umidade relativa apresentou tendências significativas de redução para grande parte dos períodos em estudo de todos os municípios do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, exceto o trimestre OND desses municípios. Esses resultados implicam em um alerta para o planejamento das produções futuras, uma vez que a falta de umidade pode comprometer a produção canavieira.

Vale dizer que as análises de tendências das variáveis climáticas não indicarem, por elas mesmas, relações de causa e efeito com a colheita e produção da cana-de-açúcar. Porém, pode-se dizer que, em conjunto com questões agrônomicas, econômicas, políticas e tecnológicas são fatores que devem influenciar tomadas de decisões futuras para a manutenção e aumento da produtividade do produto.

Nesse sentido, sugere-se que pesquisas futuras busquem identificar os efeitos dos fatores mencionados sobre a relação entre produção e área colhida, ou produtividade, da cana-de-açúcar, que é um dos principais produtos da pauta de exportação brasileira. Nesses estudos, é importante que as inter-relações temporais e locais sejam consideradas, uma vez que foi verificada tendências temporais em muitas das séries temporais e para muitos municípios produtores.

REFERÊNCIAS

- ARALDI, R., SILVA, F. M. L., ONO, E. O., RODRIGUES, J. D. Flowering in sugarcane. **Ciência Rural**. Santa Maria (RS), v.40, n.3, p.694-702, mar, 2010
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p. 337-350, 2010.
- ALVES, L. Q. et al. Desempenho da produção da cultura de cana-de-açúcar nos principais produtores. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, pág. 303-317, 2021.
- BRITO, J.L.S., REIS, L.N.G. Mapeamento de áreas de conversão do uso da terra para cana de açúcar na mesorregião do triângulo mineiro/alto Paranaíba-MG por meio de imagens TM/Landsat. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia 13(41):170–186, 2012.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Açúcar/Perspectiva 2020**: Produção mundial pode se retrair, após duas temporadas. USP –Universidade de São Paulo, 2020.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: v. 7 - Safra 2020/2021, n. 4 – Quarto levantamento, Brasília, p.1-57, 2021.
- COSTA, R. A., & QUEIROZ, A. T. (2021). Definição da duração da estação seca e estação chuvosa e sua influência na agricultura no município de Ituiutaba–MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, 28, 391-405. <<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.76418>>.
- DAYANA, M. L. The population dynamics of insects in sugarcane fiels at Audipatti, Theni district, Tamil Nadu. **Journal of the International Association of Advanced Technology and Science**, v.16, n.2, p.1-24, 2015.

- DE ALMEIDA, L. R. et al. TENDÊNCIAS METEOROLÓGICAS E ANOMALIAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO PERÍODO DE 2011-2017 PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.
- DE SOUZA, A. G.; CLEPS JUNIOR, J. 2013. Expansão da Cana-De-Açúcar No Triângulo Mineiro E Os Efeitos Sobre A Agricultura Familiar E O Trabalho Rural. **Revista Tópos**, V.3, N.2, P. 8-35.
- FERREIRA, D. S.; RIBEIRO, W. R.; GONÇALVES, M. S.; PINHEIRO, A. A.; SALES, R. A. de; REIS, E. F. Cenário da área irrigada por pivô central no Triangulo Mineiro, no Estado de Minas Gerais, Brasil. *Nativa*, v.6, p.613-618, 2018. <<https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5864>>.
- Food and Agriculture Organization. FAO, 2020. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#country>>. Acessado em: 10 de julho de 2022.
- INMAN-BAMBER, N. G. ET AL. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, n. 1, p. 13-26, 2008.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin, 1975.
- LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 20-37, 2018.
- MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Ed.). **Ecofisiologia da 43 Produção Agrícola**. Piracicaba: Potafós, 1987. p.113-118, 1987.
- MANHÃES, C. M. C. ET AL. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Vértices**, v. 17, p. 163-191, 2015.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, v.13, p. 245-259, 1945.

- NETAFIM. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.sugarcane crops.com/p/climate>. Acesso em 02/06/2020
- NOVAIS, G. T. Classificação Climática aplicada ao Bioma Cerrado. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. 2019. <https://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2199>.
- PERES, G., PREVITALI, F. S., 2021. Impactos ambientais e sociais do agronegócio sucroalcooleiro na região do Triângulo mineiro, Minas Gerais, Brasil a partir de 2000. *Germinal: Marxismo e Educação em Debate* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.9771/gmed.v13i2.45038>. Acesso: 24 nov. 2021.
- PORTELA, M.M.; QUINTELA, A.C.; SANTOS, J.F.; VAZ, C; MARTINS, C. Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH)**, v. 32, n. 1, p. 43-60, 2011.
- REBOITA, M. S. ET AL. Aspectos climáticos do estado de minas gerais (climate aspects in Minas Gerais state). **Revista brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.
- REIS, L. N. G. dos; BRITO, J. L. S. Mapeamento da cana-de-açúcar (2010) nas microrregiões do Triângulo Mineiro-mg utilizando imagens rapideye. Disponível em: <http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais_enga_2012/eixos/1483_1.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- ROLDÃO, A. F. & ASSUNÇÃO, W. L. (2012). Caracterização e duração das estações seca e chuvosa no Triângulo Mineiro–MG. **Rev. Geonorte**, 1 (5), 428 – 440.
- Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar. Conab, 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acessado em: 10 de julho de 2022.
- SANCHES, F. D. O.; SILVA, R. V. DA.; FERREIRA, R. C.; CAMPOS, C. A. A. Climate change in the Triângulo Mineiro Region - Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 570 –587, 2017.

- SANTOS, H. F. Modernização da agricultura e dinâmica do agronegócio globalizado no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Revista Geografia em Questão**, v.12, n.1, p. 9-36, 2019.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American statistical association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.
- SILVA, W. K. de M. et. al. Influência das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba. 2019.
- 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. 284-290, 2016.
- TAMBORIN, C. V.; SANTOS, R. J. A EXPANSÃO DO CULTIVO DE CANA DE AÇÚCAR NA MICRORREGIÃO DE UBERABA E A PRODUÇÃO DE LEITE1. **Observatorium: Revista Eletrônica De Geografia**, v. 11, n. 3, p. 78-107, 2021.
- TAO, H.; FRAEDERICH, K.; MENZ, C.; ZHAI, J. Trends in extreme temperature índices in the Poyang Lake Basin, China. **Stoch. Environ. Res. Risk Asses.**, v. 28, p. 1543-1553, 2014.
- TREVISAN, J. E.; LIMA, N. C.; SOUZA, G. H. S.; Custo da produção da cana de açúcar em uma usina sucroalcooleira da Região do Triângulo Mineiro. **Revista de Estudos Contábeis**, v. 8, n. 14, p. 39–57, 2019.
- VERHEYE, W. H. (Ed.) **Soils, Plant Growth and Crop Production-Volume II**. EOLSS Publications, 2010.
- WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: Conceptions and definitions. In: *Drought: A global assessment*. Nebraska: Routledge, 2000. p. 111–120.
- XAVIER, A. C., SCANLON, B. R., KING, C. W., & ALVES, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, 1–15.< <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.>

CAPÍTULO 3

Efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividade da cana de açúcar no Triângulo Mineiro- Minas Gerais: uma abordagem com dados em painel dinâmico

Resumo: Este estudo teve por objetivo avaliar os efeitos de variáveis climáticas, meteorológicas e econômicas sobre a produtividade da cana de açúcar de municípios produtores do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais, Brasil. Para tanto, utilizou-se um modelo de dados em painel dinâmico, estimado pela abordagem de Arellano-Bond (1991) e Métodos dos Momentos Generalizados, com informações de oito municípios para o período entre 2009 e 2019. As variáveis explicativas da produtividade foram: temperatura, precipitação, radiação solar, umidade relativa do ar, preço médio da cana e preço médio dos insumos. Os resultados apontaram que a produtividade é positivamente afetada por seus valores defasados de um ano e pelo preço médio do produto. Por outro lado, verificaram-se efeitos negativos e pequenos da precipitação e negativos e consideráveis da radiação solar.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; produtividade; painel dinâmico; variáveis climáticas; variáveis meteorológicas; variáveis econômicas.

Effects of climatic and economic variables on sugarcane productivity in Triângulo Mineiro- Minas Gerais: a dynamic panel data approach

Resumo: This study aimed to evaluate the effects of climatic, meteorological, and economic variables on sugarcane productivity in producing municipalities in Minas Gerais, Brazil. For this purpose, a dynamic panel data model was used, estimated using the Arellano-Bond approach (1991) and Generalized Moments Methods, with information from eight municipalities for the period between 2009 and 2019. The explanatory variables of productivity were: temperature, precipitation, solar radiation, relative air humidity, average sugarcane price, and the average price of inputs. The results showed that productivity is positively affected by its values lagged by one year and by the average price of the product. On the other hand, there were negative and small effects of precipitation and negative and considerable effects of solar radiation.

Key-words: sugar cane; productivity; dynamic panel; climatic variables; meteorological variables; economic variables.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos de variáveis climáticas e econômicas sobre a produtividade da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais, considerando diferentes períodos de tempo, por meio de um modelo com dados em painel dinâmico. A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das principais culturas agrícolas do mundo e possui grande relevância econômica no cenário mundial, sendo o Brasil o maior produtor. No que tange à sua finalidade, a cana-de-açúcar no Brasil é destinada principalmente para a produção de açúcar e etanol (CONAB, 2018).

Esta cultura exerce papel fundamental tanto no mercado interno quanto no externo, sendo a região Nordeste do Brasil (NEB) considerada o berço da cana-de-açúcar no país, graças ao açúcar da cana que foi o primeiro grande produto de exportação (NASCIMENTO & SANTOS, 2005; DE ABREU et al., 2013; CONAB, 2018). Atualmente, a cana-de-açúcar também é cultivada na região Centro-Sul, o que permite que a safra ocorra no país durante todo o ano, sendo de abril a novembro na região Centro-Sul, e de novembro a abril no NEB (CONAB, 2018).

No estado de Minas Gerais, a atividade canavieira foi introduzida com um objetivo secundário, o suprir as necessidades da população envolvida com a extração do ouro, com a produção de açúcar e cachaça (CAMPELO, 2002; FERNANDES, 2005; SIQUEIRA, 2013; FISCHER et al., 2017). No estado, a região do Triângulo Mineiro foi a que mais expandiu o cultivo da cana-de-açúcar, com o estabelecimento de várias usinas na região (DE SOUZA; CLEPS JUNIOR, 2009; ZANZARINI et al., 2009; VARGAS; MICHELLOTTI, 2011; CASTANHO; SOUTO, 2013).

A região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba soma cerca de 70% da área plantada de cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais (MATOS; MARAFON, 2018; SIAMIG, 2016). Essa região se destaca como área prioritária para a incorporação de novas áreas de cultivo de cana-de-açúcar por diversos fatores de ordem social, política, econômica e condições naturais.

As exigências para o plantio de cana-de-açúcar, relacionadas às condições ambientais estão devidamente interligadas aos elementos climáticos (temperatura do ar; umidade relativa do ar e radiação solar), solo e disponibilidade de nutrientes (MEZAROBA; MENEGUETTI; GROFF, 2010). O clima possui papel relevante para a

produtividade da cana-de-açúcar, já que essa cultura apresenta exigências climáticas ao longo do seu desenvolvimento e quando essas não são atendidas, geralmente, ocorrem danos ao crescimento e desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, no produto final (DAYANA, 2015; NETAFIM, 2020).

A cana-de-açúcar é considerada uma planta tropical, sendo assim, encontra condições climáticas ideais em grande parte do Brasil para seu estabelecimento. Desta forma, iniciativas que visem à previsibilidade do impacto do mercado e das condições ambientais no sistema sucroalcooleiro são relevantes para a adoção de estratégias de gestão para melhoria da produtividade da cana-de-açúcar e para o aumento da rentabilidade ao setor canavieiro do país (SALLES SCARPARI; GOMES FERREIRA DE BEAUCLAIS, 2009; CUADRA, et al. 2012; SOUSA et al., 2012; SANT'ANNA, et al., 2016).

Nesse sentido, diversas pesquisas vêm sendo realizadas para estimar a produtividade da cultura por meio do uso de dados agronômicos, meteorológicos e socioeconômicos. Alguns estudos econométricos fundamentados na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos, utilizaram modelos hedônicos com dados *cross-section* e dados em painel com efeitos fixos para analisar a influência do clima na agricultura (MENDELSON; NORDHAUS; SHAW, 1994; DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007; ARAÚJO et al., 2014; BIRTHAL e HAZRANA, 2019; SILVA, 2019). Os dados em painel dinâmico são também uma metodologia promissora para avaliar os impactos das áreas plantadas na produção agrícola (MYTHILI, 2012); da oferta das principais *commodities* alimentares nas mudanças nos preços de produção e na volatilidade (HAILE; KALKUHL; VON BRAUN, 2016); das variáveis agrometeorológicas e econômicas na produtividade agrícola (FIGUEIRA; ROLIM, 2020).

No âmbito da cultura da cana-de-açúcar, diferentes estudos analisam a estimativa da produtividade com base em métodos e modelos distintos (VIDIGAL et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012). Todavia, observa-se que ainda são proeminentes abordagens que considerem a complexidade dos efeitos de múltiplas variáveis sobre a produtividade dessa cultura no Brasil e, em especial, na região do Triângulo Mineiro.

Assim, a contribuição do presente estudo está no emprego da metodologia com Dados em Painel Dinâmico com efeitos fixos, que, além de captar os efeitos da heterogeneidade não observada, inclui a relação intertemporal da produtividade nela mesma. Ainda, foram consideradas para a determinação da produtividade múltiplas

variáveis (climáticas e econômicas). Dentre elas, estão elementos climáticos (temperatura do ar, precipitação atmosférica, radiação solar e umidade relativa do ar) e os fatores econômicos (valor da produção, preço da cana-de-açúcar e preço de insumos).

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo do trabalho foi a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (~90.545 km²) localizada no estado de Minas Gerais, na região Sudeste do Brasil, compreendendo as latitudes 17°55'12"S e 20°41'30"S, longitudes 45°33'30"W e 51°02'18"W e altitude 323 a 1547 m. O clima é típico da região Sudeste do Cerrado; tropical com verões chuvosos e quentes e invernos secos e frios. A precipitação média anual na área de estudo é de ~ 1584,7 mm, com ~ 230,6 mm precipitado na estação chuvosa (outubro a março). A estação seca (maio a setembro) possui característica marcante de déficit hídrico intenso, com acumulado mensal de chuva máximo de 318,51 mm e mínimo de 131,42 mm. As temperaturas médias anuais do ar variam de 21 °C a 24 °C.

Situados dentro da região de estudo estão os municípios com maior volume de produção produzido de cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais: Campo Florido, Conceição das Alagoas, Frutal, Iturama, Pirajuba, Santa Juliana, Santa Vitória e Uberaba. Em 2020, estes municípios correspondiam a um volume médio anual de produção de aproximadamente 52,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar ou 6,94% da produção brasileira.

A paisagem na área de estudo compreende um mosaico com vegetação nativa, característica dos biomas Cerrado e Mata Atlântica, áreas com agricultura (grãos: soja e milho; algodão; pastagens; e nos últimos anos, à expansão da cana-de-açúcar) e outros usos da terra (VIANNA et al., 2018). Os solos predominantes na área de estudo são os Latossolos, e a topografia plana. Estas condições de clima, solo e topografia possibilitam o plantio de cana-de-açúcar sem manejos excessivos na região de estudo (Figura 1).

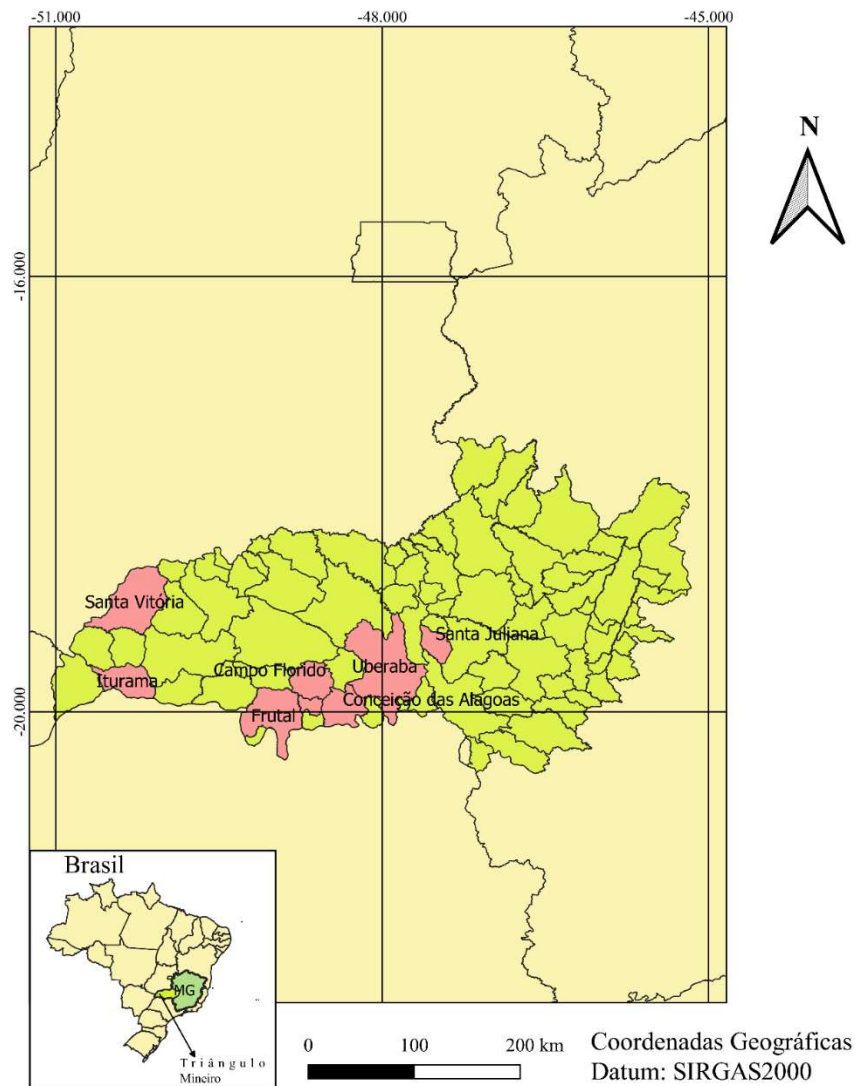


Figura 1: Localização do Triângulo Mineiro, destacando os municípios estudados. Fonte: Autor.

2.2 Banco de dados

O período de análise desta pesquisa corresponde aos anos entre 2009 e 2019. Como as informações compreendem 8 municípios, o tamanho total da amostra é de 88 observações. Os dados da variável de interesse produtividade anual da cana-de-açúcar (toneladas colhidas por hectare – t/ha) foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

As variáveis meteorológicas utilizadas foram precipitação (profundidade em metros) e temperatura (graus Celsius). Ambas, obtidas de produtos de reanálises (mescla de dados provenientes de modelos de circulação geral da atmosfera e dados observados em estações meteorológicas de superfície) devido à necessidade de

dados contínuos (sem falhas). A precipitação atmosférica foi extraída do produto de reanálise *Climate Hazard Group Infra Red Precipitation with Station* (CHIRPS). Já, as informações sobre temperatura do ar (temperatura do ar a 2m acima da superfície da terra, do mar, ou das águas terrestres) foram obtidas da reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5) (STÜKER et al., 2016; LIMBERGER; SILVA, 2018).

As variáveis climáticas são a radiação solar (radiação de ondas curtas que atinge um plano horizontal na superfície da Terra menos a quantidade refletida pela superfície da Terra em J/m^2) e a umidade relativa do ar (pressão do vapor de água em relação ao valor saturado - %). Elas também foram obtidas, via reanálise, do ERA5.

Os dados econômicos empregados são o preço médio real da cana-de-açúcar (US\$/tonelada), o preço médio ao consumidor do etanol hidratado (R\$/litro) e o preço médio dos insumos agropecuários (US\$). Os dois primeiros foram obtidos dos relatórios mensais da Secretária de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA) e o último, da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab).

2.3 Modelo Econométrico

Uma modelagem de dados em painel dinâmico foi empregada para avaliar os efeitos dos elementos climáticos e econômicos sobre a produtividade da cana-de-açúcar nos municípios maiores produtores da cultura no estado de Minas Gerais. Essa metodologia é eficiente para estimar parâmetros robustos, na presença de endogeneidade, autocorrelação serial e heterogeneidade não observada, o que permite uma melhor compreensão das dinâmicas de ajustamento (BALTAGI, 2008).

A natureza dinâmica no processo de estimação foi captada pela utilização da variável dependente com defasagem em dois períodos como variáveis explicativas. Além disso, pelo fato de a amostra corresponder a um painel curto (n° municípios é menor que a série temporal analisada), empregou-se a abordagem de Arellano e Bond (1991). Como instrumentos, utilizaram-se os valores defasados das variáveis explicativas.

Logo, o modelo econométrico utilizado para analisar o efeito das variáveis explicativas sobre produtividade da cana-de-açúcar, é representado pela seguinte equação:

$$\ln Y_{it} = \alpha_i + \beta_1 \ln Y_{it-1} + \beta_2 \ln Y_{it-2} + \beta_3 \text{prec}_{it} + \beta_4 \text{temp}_{it} + \beta_5 \text{rad}_{it} + \beta_6 \text{ur}_{it} + \beta_7 \ln \text{pmc}_{it} + \beta_8 \ln \text{pmi}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

em que: Y_{it} é a produtividade da cana-de-açúcar no município i e no período t . O $Y_{i(t-1)}$ e $Y_{i(t-2)}$ corresponde a produtividade da cultura, no município i e com defasagem em um e dois períodos, respectivamente. O termo prec_{it} é a precipitação total; temp_{it} é a temperatura média do ar; rad_{it} é a média da radiação solar; ur_{it} é a umidade relativa média; pmc_{it} é o preço médio real da cultura; pmi_{it} é o preço dos insumos agrícolas; e ε_{it} o termo de erro aleatório.

O método utilizado para estimar (1) é o Método dos Momentos Generalizados (GMM). Os instrumentos utilizados tratam-se do conjunto de variáveis explicativas defasadas, cuja validade é verificada pelo teste de Sargan. As variáveis endógenas foram identificadas pelo teste endogeneidade de Wooldridge.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 estão apresentadas as médias da produtividade da cana (variável dependente) e das variáveis meteorológicas, climáticas e econômicas empregadas como explicativas neste estudo. Tais informações estão ilustradas para cada um dos anos entre 2009 e 2019 e para cada um dos oito municípios produtores da amostra.

De modo geral, observa-se queda da produtividade da cana ao longo do tempo, possivelmente causada pela oscilação na quantidade produzida. Quanto às variáveis meteorológicas, verifica-se queda na média da precipitação, juntamente com médias anuais constantes da temperatura (desvio padrão 0.300). Para as meteorológicas, a umidade relativa do ar teve uma amplitude de aproximadamente 8 pontos percentuais, com destaque para 62,8% em 2014 e 70,53% em 2019. Já, a radiação, apresentou variações praticamente constantes (desvio padrão 0.070).

Passando-se para as variáveis econômicas, expressas em dólares, observa-se oscilações no valor da produção e no preço da cana. Além das questões climáticas

e meteorológicas, por se tratar de uma *commodity*, o preço e conseqüente valor produzido também são afetados por oscilações do mercado e da economia internacional. Conforme Satolo e Bacchi (2009), as variações do preço médio do açúcar e do etanol são fatores importantes para explicar as variações do preço da cana-de-açúcar no Brasil. Ainda quanto aos dados do Quadro 1, por outro lado, os preços dos insumos não apresentaram grandes variações ao longo do período.

Quadro 1 – Valores acumulados de precipitação anual e médios por ano para as demais variáveis meteorológicas de precipitação e médios das variáveis do estudo por ano

Anos e Municípios	Variável dependente	Variáveis explicativas meteorológicas		Variáveis explicativas climáticas		Variáveis explicativas econômicas				
	Produtividade (t/ha)	Precipitação (mm)	Temp. (°C)	Radiação Solar (J/m ²)	Umidade Relativa do Ar (%)	Valor da Produção (mil US\$)	Preço Médio da Cana (US\$/t)	Preço médio insumo - Agrotóxico Herbicida 2.4-D (US\$/litro)	Preço médio insumo – fertilizante ³ (US\$/kg)	Preço Médio dos Insumos (US\$)
2009	88.60	1837.47	23.86	24.15	70.53	31,284.10	28.53	5.77	0.39	3.08
2010	88.60	1512.81	24.25	24.38	62.70	48,112.80	37.95	4.86	0.30	2.58
2011	88.10	1576.33	23.90	24.32	64.86	87,296.80	62.15	5.51	0.42	2.97
2012	88.13	1342.43	24.29	24.35	63.86	75,781.60	42.16	4.96	0.37	2.67
2013	86.92	1490.53	23.69	24.26	67.09	69,096.30	35.55	5.50	0.35	2.93
2014	78.54	1380.09	24.22	24.37	62.80	68,383.10	31.53	5.29	0.33	2.81
2015	78.40	1718.88	24.55	24.22	67.45	49,563.60	21.85	4.15	0.26	2.21
2016	79.84	1690.93	24.27	24.27	64.91	57,081.90	21.58	4.87	0.28	2.57
2017	81.37	1459.33	24.16	24.32	63.76	74,936.80	27.35	5.65	0.28	2.97
2018	81.61	1703.11	24.28	24.24	65.12	68,943.30	22.69	4.70	0.27	2.48
2019	81.46	1605.35	24.71	24.27	63.61	62,705.60	19.62	4.18	0.30	2.24
Campo Florido	89.84	1584.66	23.92	24.30	64.32	47,569.10	31.91	5.04	0.32	2.68
Conceição das Alagoas	88.30		24.57	24.19	64.28	75,675.60				
Frutal	79.30		24.61	24.16	65.82	90,140.80				
Ituruma	78.38		25.15	24.10	66.74	56,456.80				
Pirajuba	82.49		24.51	24.18	65.13	25,819.80				
Santa Juliana	90.52		21.85	24.70	67.42	29,225.60				
Santa Vitória	72.14		25.58	24.26	63.11	58,268.50				
Uberaba	89.27		23.40	24.40	64.40	120,979.00				

³ Ácido bórico, cloreto de potássio, sulfato de magnésio, sulfato de zinco e superfosfato simples.

Quanto aos municípios, os três principais em produtividade no período de análise foram, respectivamente, Santa Juliana, Campo Florido e Uberaba. Já, em termos de valor produzido, os destaques são Uberaba, Frutal e Conceição das Alagoas, respectivamente. As demais variáveis nada⁴ ou pouco oscilaram entre os municípios.

No Quadro 2 são expostos os resultados do modelo estimado utilizando o Método dos Momentos Generalizados (GMM), com matriz de variância-covariância robusta para heterocedasticidade. Na primeira coluna encontram-se as variáveis explicativas e na segunda seus respectivos coeficientes estimados.

O teste de Wald aponta que o modelo como um todo é estatisticamente significativo, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiança que as variáveis, em conjunto, explicam as variações na produtividade da cana na região do Triângulo Mineiro, entre 209 e 2019. Já, pelo teste de Sargan não se rejeitou a hipótese nula de que os instrumentos utilizados na estimativa são válidos. Diante disso, passa-se para a análise e interpretação dos resultados, cuja significância estatística individual dos coeficientes é feita via estatística z.

Quadro 2: Resultados das estimativas do modelo Econométrico proposto.

Variáveis	Coeficientes	Erro padrão	Estatística z	p-valor
$\ln Y_{it-1}$	0.611***	0.131	4.660	0.000
$\ln Y_{it-2}$	-0.004	0.150	-0.030	0.977
$\ln p_{mc_{it}}$	0.162**	0.076	2.130	0.033
$\ln p_{i_{it}}$	-0.037	0.121	-0.300	0.762
$prec_{it}$	-0.001**	0.000	-2.370	0.018
$temp_{it}$	-0.062	0.064	-0.960	0.338
rad_{it}	-0.985**	0.464	-2.120	0.034
ur_{it}	-0.015	0.014	-1,090	0.276
$constante_{it}$	27.813**	13.337	2.090	0.037
Teste Wald	56.130***			
Teste Sargan	54.087			

Nota: Instrumentos utilizados foram as variáveis explicativas endógenas (preço médio real da cana e preço médio dos insumos) defasadas, as pré-determinadas (precipitação, temperatura, radiação solar e umidade relativa) e preço do etanol, preço médio do agrotóxico e preço médio dos fertilizantes. *** e ** indica, respectivamente, significância estatística aos níveis de 1% e 5%.

Fonte: Resultados da pesquisa.

⁴ Assumiram-se precipitação constante entre os municípios em razão do ponto de grade ser o mesmo para todos. Os preços médios da cana e dos insumos são os mesmos no mercado.

Os resultados do modelo apontam que a Produtividade da cana-de-açúcar de um ano atrás influencia a produtividade corrente positivamente e de maneira estatisticamente significativa. Esse efeito dinâmico significa que, em média, para cada 1% de aumento no ano anterior há um aumento de 0,67% na produtividade do ano corrente. Esta influência só ocorre para um período, já que para a segunda defasagem (Y_{it-2}) não se verificou significância.

A variável preço médio real da cana-de-açúcar possui uma relação positiva e estatisticamente significativa sobre sua produtividade. O coeficiente estimado para essa variável estabeleceu que um aumento de 1% no preço médio da cana-de-açúcar ocasiona um aumento de 0,16% na produtividade. Esse resultado, corrobora com o encontrado por Sachs (2015) que verificou que o preço da cana-de-açúcar proporciona afeta positivamente na produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Os autores Satolo e Bachi (2009), também encontraram uma relação positiva e significativa entre a variável preço da cana-de-açúcar e a produtividade da mesma. Desta maneira, Sachs (2015), afirmam que quando os preços recebidos pelos produtores de cana-de-açúcar aumentam, supostamente existe uma intensificação dos tratos culturais e manejo da cultura com vistas a aumentar a produção, refletindo no aumento da produtividade dessa cultura na próxima safra.

Ademais, conforme Dos Santos et al. (2017), o preço da cana-de-açúcar é fortemente influenciado pelos preços dos produtos finais (açúcar e etanol)⁵ ou por outros aspectos como a qualidade da matéria-prima que varia ao longo do ano. Somado a isso, os autores lembram que o percentual de etanol anidro adicionado à gasolina tem sido usado pelo governo brasileiro como controle de seu preço.

Em relação à variável preço dos insumos (π), foi possível observar que a mesma possui uma relação negativa, porém não estatisticamente significativa sobre a produtividade da cana-de-açúcar. Uma possível explicação para este resultado foi a pouca variação observada destes preços em dólares ao longo do período.

Analisando as influências das variáveis climáticas sobre a produtividade da cana-de-açúcar apresentadas no modelo, precipitação (prec) e temperatura (temp)

⁵ Justamente por haver forte correlação entre o preço da cana e o preço dos seus derivados, optou-se por utilizar neste estudo apenas o preço da cana como variável explicativa da produtividade. Com isso, controla-se o problema da multicolinearidade.

pode-se observar que ambas mostraram uma relação negativa com a produtividade. Porém, em termos de significância estatística, apenas o nível de precipitação explicou as variações na produtividade, apesar de em baixa magnitude (-0,001).

Conforme os dados médios da precipitação apresentados no Quadro 1, é possível observar tendência de queda na mesma a partir de 2014, enquanto que a radiação solar se manteve relativamente constante. Apesar de o efeito negativo da precipitação não ser o esperado, Birthal e Hazrana (2019) lembram que tanto o déficit de chuva quanto o estresse hídrico prejudicam a produtividade agrícola e os danos aumentam com o aumento de sua severidade. Somado a isso se tem as interações com as variáveis climáticas.

O estresse por déficit hídrico é mais comum nos cultivos de cana-de-açúcar do que o estresse por excedente hídrico. O excesso de água no solo, devido a grandes volumes de chuva, cria condições de hipóxia, reduzindo o nível de oxigênio e inviabilizando a respiração celular da planta e dos microrganismos do solo (BOWLER et al., 1994). Períodos de excedente hídrico no solo também pode induzir o florescimento da cana-de-açúcar, desviando as reservas energéticas da planta para a produção das panículas, ao invés de utilizar para o acúmulo de sacarose, que é convertida em etanol pela indústria (ARALDI et al., 2010). Em termos de quantificação de perdas, o florescimento reduz o rendimento da cana-de-açúcar em aproximadamente 30%. Experimentos no Havaí mostraram que, se 35% das plantas em campo florescerem, há uma redução de 6 a 7 toneladas de cana por hectare (ALVES, 2016; HUMBERT, 1974).

Em relação à variável temperatura, sua ausência de significância estatística pode vir da pouca variação da mesma ao longo do período de análise e entre os municípios. Para a amostra deste estudo, a média geral foi 24,2°C, com desvio padrão de pouco mais de 1°C tanto entre os anos como entre os municípios. Importante observar que a cana-de-açúcar é considerada uma espécie vegetal de clima tropical, sendo assim, durante o estágio de desenvolvimento da cultura é desejável que a temperatura do ar varie entre 25°C e 35°C e, durante o estágio de maturação, que as temperaturas sejam inferiores a 21 °C. O desenvolvimento da cana dentro destes limites de temperatura reduz a taxa de alongamento dos colmos e promove o acúmulo de sacarose (MANHÃES et al., 2015; NETAFIM, 2020). De modo geral, todas as células da cana respondem ao estresse causado por altas temperaturas. Essa resposta se dá de maneira significativa quando a temperatura aumenta de maneira

rápida e abrupta, geralmente de 5 a 10 °C acima das temperaturas consideradas normais (MANHÃES et al., 2015; NETAFIM, 2020).

Passando-se para a variável radiação, observa-se uma influência negativa e significativa sobre a produtividade da cana dos municípios mineiros em análise. Dessa forma, quanto maior a radiação, menor a produtividade da cana. A radiação solar, na faixa do espectro eletromagnético da radiação fotossinteticamente ativa, fornece a energia necessária para os processos de fotossíntese, evapotranspiração e aquecimento do ar e da planta. O excesso de energia pode ocasionar a fotoxidação das plantas, com a indução da produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO's) que prejudicar o processo de fotossíntese como um todo.

Por fim, a umidade relativa do ar (UR) não se mostrou relevante estatisticamente para explicar a produtividade da cana-de-açúcar na amostra estudada. A região do Triângulo Mineiro possui moderada média de ur, 65% para o período todo, com mínima de 60% e máxima de 73% no período. A umidade relativa está associada com a precipitação, radiação solar, temperatura do ar e com o déficit de pressão de vapor. Em conjunto, esses elementos atuam sobre a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, sobre sua produção e produtividade (MANHÃES et al., 2015; NETAFIM, 2020).

Tal interação entre variáveis climáticas e meteorológicas, somadas com as econômicas, foram verificadas e estatisticamente confirmadas neste estudo. Assim, de modo geral, os resultados expostos oferecem alguns subsídios para entendimento dos efeitos das variáveis econômicas e climáticas sobre a produtividade da cana-de-açúcar em Minas Gerais, levando-se em conta a importância do impacto das mudanças climáticas na agricultura e na economia.

4. CONCLUSÕES

Este estudo analisou a produtividade da cana-de-açúcar em um modelo de dados em painel dinâmico para municípios produtores da região do Triângulo Mineiro (Brasil), sob a influência de variáveis climáticas, meteorológicas e econômicas, entre 2009 e 2019. Verificou-se que a interação conjunta dessas variáveis explica as variações da produtividade. Em termos individuais, as variáveis que se mostraram significativas para explicar a produtividade foram a produtividade da cana no ano

anterior (influência positiva), o preço médio da cana (positiva), níveis de precipitação (negativa) e radiação (negativa).

Pode-se observar que são a produtividade passada e o preço médio do produto os fatores de maior propulsão contemporânea na produtividade da cana-de-açúcar nos municípios mineiros em estudo. Todavia, em termos climáticos, o excesso de radiação se mostra um fator de forte influência negativa sobre a referida produtividade.

Vale ressaltar que os resultados obtidos estão em concordância com pesquisas empíricas recentes, relacionadas com as áreas de alterações climáticas e econômicas e seus efeitos na agricultura. Apesar disso, um estudo mais abrangente utilizando novas variáveis, tais como: variedades de cana-de-açúcar; número de cortes; data-de-plantio; preço de mão-de-obra; preço do açúcar; preço da terra, aumentando-se o número de anos, bem como utilizando-se uma abrangência geográfica maior, permitiria uma investigação mais detalhada sobre os efeitos das variáveis climáticas, econômicas e agronômicas na produtividade da cana-de-açúcar.

Por fim, a importância desta análise está em contribuir com a literatura e informações sobre o tema no processo de previsão da produção agrícola, que impacta na economia e é influenciada por variações climáticas, agronômicas e econômicas. Dessa maneira, é possível contribuir na elaboração de políticas de mitigação e adaptação climáticas e econômicas adequadas, que são imprescindíveis para região de estudo, evitando impactos na economia e ao meio ambiente na região mencionada.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. Canal Jornal da Bioenergia. 2016. “O florescimento da cana-de-açúcar tem época certa pra ser evitado”. Disponível em: <<https://www.canalbioenergia.com.br/como-inibir-o-florescimento-da-cana-de-acucar>>. Acessado: Abr. 20, 2022.
- ARALDI, R., SILVA, F. M. L., ONO, E. O., RODRIGUES, J. D. Flowering in sugarcane. **Ciência Rural**. Santa Maria (RS), v.40, n.3, p.694-702, mar, 2010.

- ARELLANO, M., BOND, S. 1991, "Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations." **Review of Economic Studies**, v. 58, p. 277 - 297.
- ARAÚJO, P. H. C. et al. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 45, n. 3, p. 46-57, 2014.
- BALTAGI, BH. 2005, "Econometric analysis of panel data." New Delhi: John Wiley & Sons Ltd.
- BIRTHAL, P. S.; HAZRANA, J. Crop diversification and resilience of agriculture to climatic shocks: Evidence from India. **Agricultural systems**, v. 173, p. 345-354, 2019.
- BOWLER, C.; VAN CAMP, W.; VAN MONTAGU, M.; INZE, D. (1994). Superoxide dismutase in plants. **Crit. Rev.Plant Sci.** 13: 199-218.
- CAMPELO, E.A.P. Agronegócio da cachaça de alambique de Minas Gerais: panorama econômico e social. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.23, n217, p.7-18, 2002.
- CASTANHO, R. B.; SOUTO, T. S. Produção de cana de açúcar na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. **Brazilian Geographical Journal**, Ituiutaba, v. 4, n. 1, p. 27-54, jan./jun. 2013.
- CONAB. 2018 **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA**. Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2017/18, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-73, abril 2018.
- CONAB. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA**. Acomp. safra bras. grãos, v. 6 Safra 2018/19 - Sétimo levantamento, Brasília, p. 1-69 abril 2019. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/>>.
- CUADRA, S. V. ET AL. A biophysical model of sugarcane growth. **Gcb Bioenergy**, v.4, n.1, p. 36-48, 2012.

- DAYANA, M. L. The population dynamics of insects in sugarcane fiels at Audipatti, Theni district, Tamil Nadu. **Journal of the International Association of Advanced Technology and Science**, v.16, n.2, p.1-24, 2015.
- DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts od climate chance: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v.97, n.1, p. 354-385, 2007.
- DE ABREU, M. L.; SILVA, M.A.; TEODORO, I.; DE HOLANDA, L. A.; NETO, G.D.S. Growth and productivity of sugarcane varieties as affected by water availability in the Coastal Tablelands of the Alagoas State, Brazil **Rev. Bragantia**. Campinas (SP), v. 72, n.3, p.262-270, 2013.
- DE SOUZA, A. G., CLEPS JUNIOR, J. 2013. Expansão Da Cana-De-Açúcar No Triângulo Mineiro E Os Efeitos Sobre A Agricultura Familiar E O Trabalho Rural. **Revista Tópos**, V.3, N.2, P. 8-35.
- DOS SANTOS, J. Z. et al. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PREÇOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 32, n. 3, p. 280-287, 2017.
- FERNANDES, O.W.B. Dissertação: Avaliação de Variedades de Cana-de-açúcar para a Produção de Cachaça Artesanal e a Interferência dos Resultados no Comportamento do Produtor na Região de Salinas-MG: Uma Contribuição Extensionista. UFRRJ, Seropédica, RJ, 2005, 69f.:il.
- FIGUEIRA, S. R. F.; ROLIM, G. de S. Economic and agrometeorological modeling of sugarcane productivity in São Paulo state, Brazil. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 6, p. 4836-4848, 2020.
- FISCHER, T. R.; KLEIN, C. F.; KLIEMANN, D. C.; SHIKIDA, P. F. A. Uma análise da concentração na agroindústria canavieira em Minas Gerais (safras 2002/2003 a 2014/2015). *Economia-Ensaios*, Uberlândia, 32 (1): 11-28, Jul./Dez. 2017.
- GERAIS, Minas. Secretaria de Estado De Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. **Cana-de-Açúcar. Belo Horizonte: SEAPA**, 2017. Disponível:

<<http://www.agricultura.mg.gov.br/index.php/2014-09-23-01-07-23/relatorios/agricultura>>.

- HAILE, M. G.; KALKUHL, M.; VON BRAUN, J. Worldwide acreage and yield response to international price change and volatility: a dynamic panel data analysis for wheat, rice, corn, and soybeans. In: **Food price volatility and its implications for food security and policy**. Springer, Cham, 2016. p. 139-165.
- HUMBERT, R. P. **El cultivo de la caña de azúcar**. Tradução de Alfonso Gonzalez Gallardo. México: Compañía Editorial Continental, 1974. 719p.
- LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 20-37, 2018
- MANHÃES, C. M. C. et al. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Vértices**, v. 17, p. 163-191, 2015.
- MATOS, P.F., and MARAFON, G.J. O setor sucroenergético no Brasil: efeitos e contradições. In: MARAFON, G.J., ARIAS, L.Q., and SÁNCHEZ, M.A., orgs. Apresentação. In: Estudos territoriais no Brasil e na Costa Rica (online). Rio de Janeiro: EDUERJ, 2018, pp. 41-59. ISBN 978-85-7511- 499-5.
- MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. **The American Economic Review**, v.84, n.4, p. 753-771, 1994.
- MEZARROBA, S.; MENEGUETTI, C. C.; GROFF, A. M. Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema. **Encontro de engenharia de produção agroindustrial**, v. 4, p. 9-04, 2010.
- MYTHILI, G. Acreage and yield response for major crops in the pre-and post-reform periods in India: A dynamic panel data approach. 2012.

- NASCIMENTO, R. C.; SANTOS, F. A. A. Evolução da cultura da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas em relação aos maiores produtores do Brasil, 1980/1996. **Estação Científica**. Juiz de Fora (MG), v.1, n.2, p. 1-21, ago. 2005.
- NETAFIM. Cana-de-açúcar. Available from: <<http://www.sugarcane.crops.com/p/climate>>. Accessed: Jun. 02, 2020.
- OLIVEIRA, R. A. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.
- SACHS, R. C. C. **Contribuição das inovações biológicas para a produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, 1998-2009**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Dinâmica econômica das flutuações de cana-de-açúcar. **Revista de Economia Aplicada**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 337-397. 2009.
- SALLES SCARPARI, M.; GOMES FERREIRA DE BEAUCLAIR, E. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Sci. agric.**, 2009.
- SANT'ANNA, A. C. ET AL. Ethanol and sugarcane expansion in Brazil: what is fueling the ethanol industry?. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 19, n. 1030-2017-2132, p. 163-182, 2016.
- SIAMIG - Sindicato da indústria de fabricação do álcool no estado de Minas Gerais. Perfil da produção. Available from: <<http://www.siamig.com.br/cache/Documentos/perfilproducaosite.pdf>>. Accessed: Jan. 28, 2021. doi:
- SILVA, W. K. DE M. **Influência das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- SIQUEIRA, P. H. de L.; CASTRO JÚNIOR, L. G. Determinantes da localização da agroindústria canavieira nos municípios de Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural** - RESR, Piracicaba-SP, v. 51, n. 2, p.309-330, Abr/Jun 2013.

- SOUSA, P. N.; SCUR, G.; DE CASTRO SOUZA, R. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil: gargalos e proposições para seu desenvolvimento. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 7, n. 3, p. 145, 2012.
- 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. 284-290, 2016.
- VARGAS, G. M.; MICHELLOTTO, B. D. G. Novas dinâmicas regionais: As consequências da expansão da cultura da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro – MG. *Geografia*, Rio Claro, v. 36, n. 1, p. 5-22, jan./abr. 2011.
- VIANNA, N. B. et al. Pedogeomorfologia, morfometria de bacia hidrográfica e uso dos solos como fatores condicionantes de qualidade e quantidade de água na APA do Rio Uberaba, triângulo mineiro. 2018.
- VIDIGAL, V. G.; GOMES, M. F. M.; ROCHA-VIDIGAL, C. B.; SILVEIRA, G. F. Análise espacial da produtividade da cana-de-açúcar em Minas Gerais, 1990 a 2007. **Revista de Economia e Administração**, São Paulo, v.10, n.2, p. 241-261, abr/jun. 2011.
- ZANZARINI, R. M.; SANTOS, J. R.; ALBINO, K. G. A expansão da cana-de-açúcar no triângulo mineiro - uma análise das alterações de cultivo no município de Araguari, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. Anais... Viçosa: UFV, 2009. p. 23. Available from: <<http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhoscompletoseixo11/078.pdf>> Accessed: Ago. 31, 2021.

III. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. Os indicadores estatísticos (r , R^2 , BIAS, RMSE e MRE) mostram que a precipitação do produto CHIRPS possui um padrão similar aos dados observados, seguido dado ERA5 para temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa. Ambos os produto CHIRPS e a reanálise ERA5 são recomendados para serem usados em diversas finalidades relacionadas às pesquisas climáticas.
2. As análises indicaram tendência de decréscimo para a precipitação e umidade relativa do ar na maioria dos períodos analisados, e de crescimento para a temperatura do ar e radiação solar. Dessa maneira, essas tendências poderão suceder em impactos negativos no cultivo da cana-de-açúcar, sendo fundamental compreendê-las para a elaboração de estratégias produtivas e de políticas de mitigação e adaptação climática apropriadas, que são relevantes no estado de Minas Gerais.
3. Com o modelo com dados em painel dinâmico evidenciou-se que a produtividade é positivamente afetada por seus valores defasados de um ano e pelo preço médio do produto. Ainda, apontou efeitos negativos e pequenos da precipitação e negativos e consideráveis da radiação solar sobre a produtividade.