

Fatores determinantes da eficiência técnica da cana-de-açúcar nos polos de produção do sudeste e centro-oeste brasileiros ♦

Luísa Fancelli Coelho¹
Cassiano Bragagnolo²

Resumo

Destacando-se como o principal produtor mundial de cana-de-açúcar e líder em volume de produção e exportação de açúcar, o Brasil desempenha papel central na fabricação de etanol e na geração de biomassa. Apesar da relevância do setor, poucos estudos se dedicaram a avaliar a eficiência técnica e os determinantes socioeconômicos da produção agrícola de cana-de-açúcar no Brasil. Diante da importância econômica da atividade e dessa lacuna na literatura, o objetivo deste estudo foi calcular a eficiência técnica da produção de cana-de-açúcar, utilizando o método de análise envoltória de dados (*data envelopment analysis* – DEA) para uma amostra de municípios nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso, por meio de dados do Censo Agropecuário de 2017 e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Adicionalmente, um modelo Tobit foi empregado para identificar as variáveis socioeconômicas que afetam a eficiência produtiva da cana-de-açúcar nesses estados. Os resultados apontaram que as mesorregiões de Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, em São Paulo, e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em Minas Gerais, apresentaram as maiores eficiências de produção nos municípios. Além disso, os resultados do modelo Tobit indicaram que as variáveis socioeconômicas mais relevantes para os estados analisados foram a presença ou não de usinas no município e a mesorregião à qual o município pertence.

Palavras-chave

Etanol; DEA; Tobit.

Abstract

Standing out as the world's leading producer of sugarcane and a leader in sugar production and export volume, Brazil plays a central role in ethanol manufacturing and biomass generation. Despite the sector's significance, few studies have focused on evaluating the technical efficiency and socio-economic determinants of sugarcane agricultural production in Brazil.

♦ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

¹ Doutoranda em Economia Aplicada – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Universidade de São Paulo – End: Av. Pádua Dias, 11 - Piracicaba – CEP: 13418-900 – São Paulo - SP – Brasil E-mail: luisa.coelho@usp.br – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9440-4887>.

² Professor – Universidade Federal de São Carlos – End: Rod. João Leme dos Santos, Km 110 Sorocaba – CEP: 18052-780 – São Paulo -SP – Brazil – E-mail: cassiano@ufscar.br – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9177-3791>.

Recebido: 15/12/2022. Aceito: 11/01/2024.

Editor Responsável: Rodrigo Lanna



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Given the economic importance of the activity and this literature gap, the aim of this study was to calculate the technical efficiency of sugarcane production using the Data Envelopment Analysis (DEA) method for a sample of municipalities in the states of São Paulo, Goiás, Minas Gerais, and Mato Grosso, using data from the 2017 Agricultural Census and the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels. Additionally, a Tobit model was employed to identify the socio-economic variables that affect the productive efficiency of sugarcane in these states. The results indicated that the mesoregions of Ribeirão Preto and São José do Rio Preto in São Paulo, and the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba in Minas Gerais, showed the highest production efficiencies in the municipalities. Furthermore, the Tobit model results pointed out that the most relevant socio-economic variables for the analyzed states were the presence or absence of mills in the municipality and the mesoregion to which the municipality belongs.

Keywords

Ethanol; DEA; Tobit.

JEL Classification

C60; Q16; Q29.

1. Introdução

O Brasil tem tradição no cultivo de cana-de-açúcar, sendo responsável por 38% da produção mundial (FAO 2022), o que denota um importante passo para a evolução do mercado de energias renováveis. Na produção de etanol, destaca-se a cogeração de eletricidade e a inserção da participação de usinas *flex* no mercado brasileiro. A demanda do mercado internacional por combustíveis limpos tem incentivado mudanças no uso da terra (Spavorek *et al.* 2007) pela expansão e adoção de práticas sustentáveis de produção (Viana e Perez 2013).

Antes de 1975, a partir da promulgação do Pro-Álcool, a concentração da produção canavieira com foco no etanol estava na região Sudeste do país, destacando o estado de São Paulo. A partir daí, ocorreu a expansão territorial para estados como Paraná, Goiás e Mato Grosso (Szmrecsányi e Moreira 1991). Diferenças na capacidade estrutural das regiões, presença de cultivos antigos e até mesmo conhecimentos prévios de cultivo estabelecidos nas regiões são fatores que caracterizam a heterogeneidade do ambiente produtivo brasileiro. Por isso, existem diferentes barreiras para que produtores de diferentes regiões sejam mais competitivos.

Para aumentar a competitividade de cada região produtora de cana-de-açúcar, é necessário ter ganhos de eficiência na produção. Os ganhos de eficiência podem ocorrer quando há uma quantidade maior de produto enquanto há uma redução ou estabilidade no uso de insumos¹ (O'Donnell 2018), tornando a exploração economicamente mais vantajosa (Torquato, Martins e Ramos 2009), ou ainda levar em conta a infraestrutura e *know-how* da região, considerando as peculiaridades da mesma, com respeito à infraestrutura, acesso ao crédito, disponibilidade de assistência técnica, capacidade gerencial, entre outros. A Análise Envoltória de Dados, muitas vezes referida na literatura pelo seu acrônimo em inglês DEA (*data envelopment analysis*), tem se mostrado uma abordagem adequada para mensurar a eficiência técnica relativa de unidades de produção, denominadas unidades tomadoras de decisão (DMUs). Além disso, é possível incorporar componentes da infraestrutura agrícola e do ambiente de negócios para analisar os determinantes da eficiência em cada região.

Desse modo, o objetivo deste estudo foi determinar a eficiência técnica na produção de cana-de-açúcar para uma amostra de municípios dos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso por meio de dados do Censo Agropecuário 2017 divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2017). Para a análise, será utilizada a abordagem DEA, com orientação para os insumos e retornos constantes de escala, conhecida como DEA-CCR² ou DEA-CRS (Charnes, Cooper e Rhodes 1978). Complementarmente, serão analisadas, através de um modelo Tobit, as variáveis socioeconômicas que influenciam as eficiências da produção de cana-de-açúcar.

Cabe destacar que, apesar da relevância do tema, poucos estudos se dedicaram a avaliar a eficiência técnica e seus determinantes socioeconômicos na produção de cana-de-açúcar no Brasil (Carmo e Magalhães 1999; Pereira e Tavares 2017), sendo muito dos estudos dedicado a agroindústria (Lemos et al. 2019; Duarte et al. 2019; Brunozi Junior et al. 2012; Pereira e Silveira 2016; Danelon, Spolador e Bergtold 2023). Além disto, até onde se sabe, os poucos estudos dedicados ao assunto existentes na literatura utilizam dados menos atualizados do que os empregados na análise aqui proposta e um conjunto de regiões que compõem a análise diferente deste estudo.

¹ Essa é uma das abordagens que podem explicar ganhos de eficiência.

² CCR é a abreviatura do nome dos autores Charnes, Cooper e Rhodes (Charnes, Cooper e Rhodes 1978).

Após esta breve introdução, o artigo está estruturado em quatro seções adicionais, abrangendo: revisão de literatura e considerações regionais, metodologia e tratamento dos dados, apresentação e discussão dos resultados e, por fim, as conclusões.

2. Revisão de literatura

2.1. Eficiência no setor de produção de cana-de-açúcar

Esta seção apresenta um breve panorama da produção de cana-de-açúcar e alguns dos principais estudos disponíveis na literatura que trataram sobre a eficiência no setor sucroenergético com ênfase para a eficiência na produção de cana-de-açúcar e considerações sobre aspectos regionais da produção.

A cana-de-açúcar destaca-se pela versatilidade de utilização, podendo ser destinada à produção de energia por meio da cogeração de eletricidade, bem como pela produção de subprodutos como o bagaço de cana, o melaço, o açúcar e a cachaça (Silva *et al.* 2021). Além disso, o cultivo da cana, especialmente aquela destinada à produção de etanol, possui vantagens competitivas no que tange à sustentabilidade da produção, já que é possível reutilizar parte dos seus subprodutos para, por exemplo, a fertilização do canavial, através da vinhaça, ou ainda para a alimentação animal (Rossetto *et al.* 2022).

Adicionalmente, a conversão energética de açúcar para etanol de cana-de-açúcar é considerada uma das mais eficientes (Scharlemann e Laurance 2008). Tendo em vista esse cenário e a demanda crescente por fontes de energias limpas, a cana-de-açúcar brasileira é uma opção favorável. A expectativa, ainda, é que as políticas promovidas pelo RenovaBio, que tem como principal objetivo o estímulo à produção bioenergética sustentável, estimulem ainda mais esse setor por meio da busca da produção eficiente e sustentável. Um dos resultados obtidos pelo programa foi a certificação de cerca de 89% das usinas em 2021 (Rossetto *et al.* 2022).

Quanto aos estudos sobre eficiência técnica da produção da cana-de-açúcar para o Brasil, destacam-se os realizados por Marin *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2014), Pereira e Tavares (2017) e Cardoso *et al.* (2019).

Marin *et al.* (2008) estimaram a eficiência da produção de cana-de-açúcar com respeito a influência climática e parâmetros físicos locais, tais como aptidão do solo, déficit hídrico, pluviometria, temperatura, entre outros. Oliveira *et al.* (2014) avaliaram a eficiência técnica das unidades produtoras de cana-de-açúcar por meio de um modelo DEA calculado com dados coletados de 20 unidades produtivas. Foram utilizados como insumos no modelo a análise do solo, o uso de fertilizantes, o uso de herbicidas, as práticas de cultivo, a mão-de-obra empregada, bem como o transporte da cana. Como produto no modelo, os autores consideraram a receita da cana-de-açúcar. Os resultados apontaram que cinco unidades foram consideradas eficientes, enquanto as demais foram consideradas ineficientes, devido a problemas de escala.

Analogamente, Pereira e Tavares (2017) calcularam a eficiência técnica para as maiores unidades produtoras de cana-de-açúcar do Brasil nos anos de 2008 e 2011 por meio de um modelo DEA orientado para os insumos. Os insumos considerados pelos autores foram mecanização, trabalho, aluguel, custos administrativos e outros insumos, enquanto o produto considerado foi a produção de cana-de-açúcar. Dentre as regiões, a região Centro-Sul³ tradicional, mostrou-se a mais eficiente, enquanto a região Nordeste⁴ apresentou ineficiências puras e de escala e a região Centro-Sul expansão⁵ apresentou ineficiências somente de escala. Com base em seus resultados, os autores afirmam que o maior problema das usinas de cana-de-açúcar com relação à eficiência está relacionado à escala.

Cardoso *et al.* (2019) constataram que há uma relação positiva entre a eficiência e a mecanização das unidades produtoras de cana-de-açúcar de São Paulo e das regiões Nordeste e Centro-Oeste. Os autores também apontaram que a região geográfica é um dos fatores determinantes para a eficiência na produção de cana-de-açúcar.

Há uma grande quantidade de estudos disponíveis na literatura que calculam a eficiência na produção de uma determinada cultura agrícola e, em seguida, avaliam os fatores determinantes socioeconômicos destas eficiências a partir de um modelo de regressão do tipo Tobit. Com respeito à cana-de-açúcar, especificamente, Ambetsa *et al.* (2020) mediram a efi-

³ A região Centro-sul tradicional é composta pelos estados de São Paulo sem região Oeste, Paraná e Rio de Janeiro.

⁴ Somente analisados os estados de Pernambuco e Alagoas.

⁵ Composta pelo Mato Grosso do Sul, região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais, Goiás e Oeste Paulista.

ciência técnica da produção de pequenos agricultores no Quênia utilizando um modelo de análise de fronteira estocástica. Os autores estimaram os determinantes da eficiência através de um modelo Tobit, verificando que o tamanho das famílias, o acesso à assistência técnica e o crédito eram fatores que afetavam a eficiência positivamente com nível de significância de 1%. A variável idade, no entanto, apresentou uma influência negativa sobre a eficiência técnica obtida. Diversos autores discutem diferentes aspectos produtivos que afetam o índice de eficiência, tais como condições climáticas (Smeets et al. 2008), qualidade e tipo de solo (Torquato, Martins e Ramos 2009; Smeets et al. 2008; Marin et al. 2008), variedade genética da cana-de-açúcar (Siqueira e Reis 2006) e infraestrutura (Martinelli et al. 2011).

2.2. Considerações regionais sobre o setor

De acordo com dados da CONAB (2020), o estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, sendo responsável por mais de 50% da produção. Esta liderança deve-se ao fato do estado possuir melhores condições para o desenvolvimento desse setor, tais como, solo, clima e infraestrutura (Duarte et al. 2019; T. B. A. Oliveira et al. 2014; Pereira e Tavares 2017). Apesar disso, há uma tendência de descentralização do setor, expandindo-se para o Centro-Oeste por conta do elevado preço das terras devido à saturação de áreas consolidadas e mais oportunidades para a produção (Shikida 2013; Vedana et al. 2019).

É nesse contexto que o estado de Goiás, segundo maior produtor nacional, tem aumentado sua produção, que corresponde a 11% da área colhida de cana-de-açúcar e 12% da produção. Minas Gerais ocupa a terceira posição, com 9,7% da área colhida e 10,7% da produção de cana-de-açúcar (CONAB 2020). Na quarta posição, está o estado do Mato Grosso do Sul que teve um grande crescimento da produção, especialmente em 1983, alguns anos após o início do Proálcool em 1975 (Shikida 2013). No Mato Grosso do Sul, além das condições edafoclimáticas propícias para o cultivo, ainda há o efeito *spillover* de tecnologias de outros cultivos como a soja e o milho (Domingues 2011).

A partir desse processo de expansão territorial da produção canavieira, estabeleceram-se as diferenças nas regiões produtoras. Mattei e Shikida (2021) no intuito de avaliar os 100 maiores municípios produtores de

cana-de-açúcar em 2017, mediram o Índice de Modernização Agrícola desse grupo. Os municípios paulistas se destacaram nos subíndices de uso da terra e intensivo em trabalho, os quais referem-se à quantidade de máquinas e proporção de máquinas por trabalhador, respectivamente. No entanto, os municípios dos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul foram mais bem colocados no subíndice de técnicas de cultivo, onde mede-se uso do plantio direto nas propriedades. O resultado estadual atribuiu índice de modernização agrícola para os estados de São Paulo e Goiás, dentro da amostra analisada. Tal resultado demonstra as peculiaridades de produção de cada município e como é possível manter a competitividade.

Souza e Teixeira (2014) estimaram a Produtividade Total dos Fatores (PTF) da cana-de-açúcar para o estado de Goiás entre 1985 e 2006. Os resultados apontaram para uma redução da PTF em todas as microrregiões analisadas com exceção a Pires do Rio, pertencente ao Sul Goiano. A eficiência também regrediu em média, mas em menor magnitude do que a PTF. As microrregiões de Anicuns e Catalão, ambas no Sul Goiano, apresentaram o maior acréscimo, quase que dobrando os valores iniciais.

Vedana *et al.* (2019) realizaram uma análise exploratória de dados para as produtividades da cana-de-açúcar brasileira em suas diferentes mesorregiões. Os autores apontaram que, principalmente, os estados de São Paulo e Bahia são os mais intensivos em produtividades da cana, devido à especialização de venda para agroindústrias. Mesmo assim, a análise de Moran realizada pelos autores indicou que há uma concentração de avanços nos rendimentos principalmente na região de expansão agrícola canavieira (Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), apesar da crise do setor, desde 2008, e consequentes quedas de produção.

De acordo com Cardoso *et al.* (2019), custos de produção mais baixos, uso da mecanização e ausência de queimada da palha podem ser atributos que garantem melhores produções. Os custos de produção tendem a ser menores na região de São Paulo e Centro-Oeste brasileiros. Não queimar a palha da cana se caracteriza como um bom atributo ambiental para aqueles que o aderem no setor, bem como o uso da mecanização agrícola promove maiores aumentos de salário e qualidade de vida para trabalhadores. Isso reflete a complexidade com que o setor emprega seus recursos.

É ainda preciso levar em conta os diferentes ambientes produtivos para cada região. O *flexing*, expressão empregada para denominar a conversão

de usinas de etanol convencionais para flex, utilizado por McKay *et al.* (2016), é um fenômeno que está ocorrendo principalmente no Centro-oeste brasileiro. Os autores comentam sobre a importância do financiamento de linhas de crédito do BNDES e ainda em relação à entrada do mercado de créditos de carbono, sendo que estas particularidades são diferenciais para a expansão da cadeia sucroenergética no Centro-Oeste.

Em termos legislativos, é evidente a diferença de escopo para cada região geográfica. O primeiro projeto de lei de incentivo à produção de etanol no estado do Mato Grosso foi em 1999, anteriormente voltado à micro destilarias, o qual foi somente aprovado, modificado, no ano de 2002 com a aprovação e denominado Proálcool Mato-Grossense (Lei nº 7.874 de 26 de dezembro de 2002). Já em São Paulo e Minas Gerais, no ano de 2005, e Goiás, em 2009, foi aprovado a Política Estadual de Incentivo às Micro destilarias de Álcool e Beneficiamento de Produtos Derivados da Cana-de-Açúcar (Lei nº 11.879 de 19 de janeiro de 2005, Lei nº 15.456 de 12 de janeiro de 2005, Lei nº 16.589 de 16 de junho de 2009). O foco das políticas foi determinante para traçar o desenvolvimento do setor em cada uma das regiões.

O ICMS também atua na competitividade de determinadas unidades produtivas por ter alterações anuais na tributação estadual. No ano de 2000, em Goiás, foi instaurado o Programa de Desenvolvimento Industrial de Goiás (Neves e Mendonça, 2020), o que permitiu que usinas de diferentes portes pudessem receber até 73% de deduções no ICMS. No que tange ao município, é possível observar leis municipais que tratam da redução ou proibição da queima da palha de cana-de-açúcar (para o estado de São Paulo está em conformidade com a Lei nº 11.241 de 19 de setembro de 2002), o que torna, de forma obrigatória, o ambiente produtivo mais sustentável, e ainda leis de subsídio à infraestrutura logística. Dois municípios do Rio Grande do Sul, por exemplo, receberam ajuda logística da instituição municipal (Lei Municipal nº 1.606, de 25 de setembro de 2007 e Lei Municipal nº 2.779, de 10 de dezembro de 2019). Esse e outros fatores determinam o ambiente produtivo de cada região.

3. Metodologia e tratamento dos dados

3.1. Metodologia

A metodologia empregada neste estudo consiste na aplicação de um modelo do tipo DEA-CCR orientado aos insumos, seguido de uma análise dos determinantes socioeconômicos da eficiência a ser realizada por meio de um modelo Tobit. Assim, na primeira etapa, um modelo do tipo DEA-CCR será utilizado para calcular as eficiências das unidades de produção de cana-de-açúcar e na segunda etapa, será realizada uma análise por meio de um modelo Tobit para inferir sobre as variáveis socioeconômicas que afetam as eficiências da cana-de-açúcar obtidas por meio do modelo DEA-CCR da primeira etapa.

Optou-se pelo uso da metodologia DEA devido à utilização de dados censitários mais abrangentes, que não seguem uma forma funcional definida. Com relação ao tipo de DEA empregado, optou-se pela DEA-CCR pois, apesar do contexto das usinas de etanol do eixo Sudeste o ganho ocorrer por questões relacionadas à escala (Danelon, Spolador e Bergtold 2023), o cenário aqui abordado refere-se à produção primária de cana-de-açúcar, que pode ter diferentes finalidades e cuja tecnologia de produção já está disseminada nas diversas regiões brasileiras.

A DEA é uma técnica de programação linear que calcula a eficiência relativa de uma determinada amostra de DMUs (do acrônimo em inglês para *Decision Making Units*, que pode ser traduzido como Unidades de Tomada de Decisão) construindo uma fronteira relativa de produção (Coelli, Rao e Battese 1998; O'Donnell 2018). As DMUs mais eficientes são aquelas que produzem a maior quantidade de produto dado um nível fixo de insumos ou utilizam a menor quantidade de insumos possível dado um nível fixo de produto. O modelo DEA-CCR com orientação aos insumos pode ser representado por meio das expressões (1), (2) e (3) (Cooper, Seiford e Zhu 2011).

$$Eff = \min \sum v_i x_{i0} = q \quad (1)$$

$$\mu_r, \quad v_i \geq 0; \quad \forall r, \forall i$$

s. a.

$$\sum v_i x_{ij} - \sum \mu_r y_{rj} \geq 0; \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum \mu_r y_{r0} = 1; \quad (3)$$

$\forall r, \forall i$

Em que y_{rj} e x_{ij} são os produtos e os insumos, respectivamente, de cada DMU denotados por $j\{1, \dots, n\}$ e que devem ser positivos. Os termos μ_r e v_i são os pesos atribuídos a cada variável que serão resultado da solução do problema. Essas relações são duais e normalmente conhecidas como “Modelo de Farrell”, devido ao fato da formulação seminal ter sido proposta por Farrell (1957).

A expressão (4) apresenta a função de produção e as variáveis de entrada e saída do modelo utilizadas na primeira parte da análise do estudo que considera a produção de cana-de-açúcar.

$$Q_{sug} = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4)$$

Na qual: Q_{sug} é a receita relativa da produção de cana-de-açúcar de cada município da amostra, que corresponde à razão entre o valor bruto da produção de cana-de-açúcar do município e a quantidade de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar do município no ano de 2017; x_1 é a área colhida de cana-de-açúcar, calculada a partir da razão entre a área total de cana-de-açúcar colhida em cada município e a quantidade de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar do município no ano de 2017; x_2 é o número de empregados relativos na cana-de-açúcar, calculado pela razão entre o número de empregados total (temporários e permanentes) na cana-de-açúcar no município em 2017 e a quantidade de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar do município no ano de 2017; x_3 representa o custo relativo com combustíveis e lubrificantes, calculado pela razão entre o custo total com combustíveis e lubrificantes para a cana-de-açúcar em cada município e a quantidade de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar do município em 2017 e x_4 é o dispêndio relativo com pesticidas na cana-de-açúcar em 2017, calculado pela razão entre as despesas totais com pesticidas em cada município para a cana-de-açúcar e a quantidade de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar do município no ano de 2017.

A análise dos valores obtidos para as eficiências calculadas por meio do modelo DEA-CCR será feita de acordo com o proposto por Sueyoshi e Kiriara (1998) e Balbino *et al.* (2020), conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação adotada no estudo para as eficiências das unidades tomadoras de decisão

Classificação	Valor da eficiência
Eficiente	1
Alta eficiência	$\geq 0,8$ e < 1
Eficiência regular	$\geq 0,5$ e $< 0,8$
Baixa eficiência	$< 0,5$

Fonte: Adaptado de Sueyoshi e Kiriara (1998) e Balbino *et al.* (2020).

O uso de modelos do tipo Tobit como uma análise de segundo estágio dentro do contexto de modelos de eficiência da mesma natureza do empregado neste estudo, permite compreender os fatores que determinam as eficiências calculadas na primeira etapa da análise. O modelo em questão foi desenvolvido por Tobin (1958) e é amplamente utilizado para análise de bases de dados que contém variáveis censuradas ou limitadas como variáveis dependentes. O modelo Tobit é apresentado pelas expressões (5) e (6) (Wooldridge 2012).

$$y^* = \beta_0 + x\beta + \mu|x \sim Normal(0, \sigma^2) \quad (5)$$

$$y = \max(0, y^*) \quad (6)$$

O modelo distribuição normal dos erros e média condicional linear.

Por fim, para verificar a adequação das variáveis empregadas ao modelo proposto, foram empregados o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk 1965) e o teste de multicolinearidade de Farrar-Glauber (Farrar e Glauber 1967).

3.2. Tratamento dos dados

Os dados acerca dos insumos utilizados no modelo DEA-CCR e das variáveis explicativas do modelo Tobit foram retirados do Censo Agropecuário 2017 divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2017).

Foram selecionados os estados com maior produção de cana-de-açúcar e que possuem informação disponível para a análise. Seguindo estes critérios, os estados selecionados para compor a amostra foram São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. De acordo com dados da Conab (2021), esses quatro estados produziram em conjunto 81% da produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2018/2019 e 83% da produção brasileira de cana-de-açúcar nas safras 2019/2020 e 2020/2021. Apesar da relevância e expansão da produção de cana-de-açúcar no Mato Grosso do Sul, este estado não faz parte da base devido à falta de dados para a análise. Destaca-se também que nem todos os municípios pertencentes aos estados analisados foram considerados nos cálculos do modelo. Isso ocorreu devido à falta de dados para algumas localidades.

Todos os dados empregados no modelo foram expressos em termos relativos de escala, fazendo-se uma razão entre o valor total da variável para o município e o número de estabelecimentos rurais existentes em cada município. Os dados obtidos a partir deste procedimento, podem ser interpretados como propriedades “padrão”, ou seja, uma propriedade que contém as características médias para cada uma das localidades consideradas. Este procedimento foi necessário para controlar possíveis vieses relativos à escala de produção de cada município, caso fossem utilizados os valores totais e não relativos, bem como, minimizar a influência de possíveis *outliers* na base. Como os modelos DEA são sensíveis à *outliers*, utilizou-se um fator de correção, para moderar valores discrepantes da base de dados. O procedimento de correção baseou-se em Souza *et al.* (2020) que separou os valores *outliers* da análise por meio do procedimento apresentado por meio da expressão (6).

$$f = \frac{\text{valor bruto da variável no município } i}{\text{desvio padrão da variável do estado}} \quad (6)$$

Todas as variáveis foram posteriormente analisadas por meio de gráficos *boxplot* para identificar o efeito da correção.

O Quadro 2 apresenta uma breve descrição destas variáveis explicativas utilizadas na regressão Tobit. Ressalta-se que a variável dependente do modelo é a eficiência calculada para a produção de cana-de-açúcar na primeira etapa da análise. As variáveis utilizadas no modelo foram subdivididas em quatro grupos que delimitam de alguma forma a produção canavieira, sendo eles: Produção agrícola, demográficas e econômicas, localização geo-

gráfica e suporte agrícola. Tais variáveis permitem explorar os diferentes eixos em que a produção canavieira é determinada no campo.

Quadro 2 - Descrição das variáveis utilizadas no modelo Tobit

Grupo	Variável	Descrição
Produção agrícola	Agricultura familiar	Participação de agricultores familiares na produção do município (IBGE 2017).
Produção agrícola	Técnicas de cultivo	Quantidade de estabelecimentos que utilizam técnicas de plantio direto e cultivo mínimo no município (IBGE 2017).
Produção agrícola	Rotação de culturas	Quantidade de estabelecimentos que cultivam soja e/ou amendoim em rotação com a cana-de-açúcar no município (IBGE 2017).
Produção agrícola	Usina	Variável binária: Se há (1) ou se não há (0) usina de etanol no município (ANP 2020).
Demografia e economia	Escolaridade	Média da escolaridade dos agricultores responsáveis pela produção nas lavouras temporárias de cada município (IBGE 2017).
Demografia e economia	Idade	Média da idade dos agricultores responsáveis pela produção nas lavouras temporárias de cada município (IBGE 2017)
Demografia e economia	Mulheres	Porcentagem de agricultoras responsáveis pela produção em propriedades de cana-de-açúcar de cada município (IBGE 2017)
Demografia e economia	Receita	Porcentagem de estabelecimentos rurais que possuem como atividade principal a venda de produtos agrícolas em cada município (IBGE 2017).
Localização geográfica	Mesorregião	Variável binária: Se determinado município pertence (1) ou não pertence (0) a uma determinada mesorregião.
Suporte agrícola	Assistência técnica	Porcentagem das propriedades de cana-de-açúcar que recebem assistência técnica em cada município (IBGE 2017).
Suporte agrícola	Crédito rural	Porcentagem das propriedades de cana-de-açúcar que tem acesso a crédito rural no município (IBGE 2017)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Rossetto *et al.* (2022) apontam que várias espécies de crotalaria, soja e amendoim são adaptáveis para realizar a rotação com a cana-de-açúcar. Além de reduzir impactos para o solo, a rotação serve como importante fator para reduzir custos na lavoura devido ao menor uso de fertilizantes. A rotação de culturas foi incluída no modelo e representa a proporção da quantidade de estabelecimentos de cana-de-açúcar que também possuem lavouras de soja e/ou amendoim. As boas práticas agrícolas podem ser mensuradas pela variável “Técnicas de cultivo” sendo computada pela proporção das propriedades que realizam cultivo mínimo ou plantio direto.

Para o cálculo dos modelos utilizou-se o *software* R. O pacote “*deaR*” foi utilizado para calcular ambas as análises de eficiências. O pacote “*VGAM*” foi utilizado para calcular o modelo Tobit da análise de segundo estágio.

Para atenuar possíveis erros de medição, utilizou-se um *bootstrap* para recalculas as eficiências (Simar e Wilson 1998). Segundo Lemos *et al.* (2019), esse método consiste na repetição da amostragem dos dados, inferindo-se estatisticamente sobre a distribuição da amostra, já que os modelos do tipo DEA não computam os intervalos de confiança das variáveis estimadas. Assim, somente as variáveis com estatísticas significativas calculadas através do método de *bootstrap* serão analisadas. Adicionalmente, as variáveis utilizadas no modelo DEA só são consideradas caso tenham valores positivos e diferentes de zero. Finalmente, as variáveis dependentes foram normalizadas antes de serem inseridas no modelo e submetidas ao teste Shapiro-Wilk.

4. Resultados e discussão

Nas subseções a seguir são apresentados os resultados para cada um dos estados que compõem as análises separadamente. Ressalta-se que cada DMU representa um município pertencente aos quatro estados analisados. As variáveis independentes utilizadas na regressão Tobit são as descritas no Quadro 2.

4.1. São Paulo

Após os ajustes realizados na base de dados, a amostra final para o estado de São Paulo é composta de dados provenientes de 240 municípios, cada um deles representando uma DMU na análise, o que contempla 37,4% do total de municípios existentes no estado. O estado de São Paulo possui 15 mesorregiões, dentre as quais 13 mesorregiões tinham municípios pertencentes à base de dados utilizada neste estudo. Na Tabela 1 pode-se visualizar as estatísticas descritivas das variáveis que compõem a base de dados referente aos municípios do estado de São Paulo.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das eficiências calculadas para o estado de São Paulo – municípios selecionados – 2017

Estatística	Eficiência (entre 0 e 1)
Valor mínimo	0,08
Valor máximo	0,86
Valor médio	0,55
Desvio Padrão	0,17

Fonte: Resultados da pesquisa.

A maior parte das DMUs (ou municípios) analisadas está na faixa de eficiência compreendida entre 0,5 e 0,6 e o desvio padrão foi de 0,17 (Tabela 1). Pereira e Tavares (2017) encontraram resultados que apontam para um nível de eficiência na produção de cana-de-açúcar de 0,7 nos anos de 2007 a 2012, utilizando dados de 15 DMUs, de São Paulo e outras regiões brasileiras, valor consideravelmente superior ao encontrado neste estudo. A quantidade de DMUs utilizada nos cálculos do modelo dos autores, o fato de utilizar dados em nível de propriedade rural ao invés de médias para os municípios, além da diferença na distribuição geográfica dos dados, são os motivos mais prováveis para a diferença nos resultados obtidos. Ressalta-se, ainda, que neste estudo não foram encontradas DMUs com índice de eficiência igual a um.⁶ A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das eficiências para o estado de São Paulo calculadas com base nos dados para o ano de 2017.⁷

⁶ Isto ocorreu devido ao uso da técnica de *bootstrap*. No cálculo do *bootstrap* as eficiências foram recalculadas duas mil vezes com a omissão de diferentes DMUs em cada um destes cálculos e só seria possível que um município obtivesse eficiência máxima de 1 caso apresentasse eficiência máxima em todas as simulações realizadas.

⁷ Os municípios que aparecem em cinza no mapa não foram considerados na análise devido à indisponibilidade de dados para os cálculos.

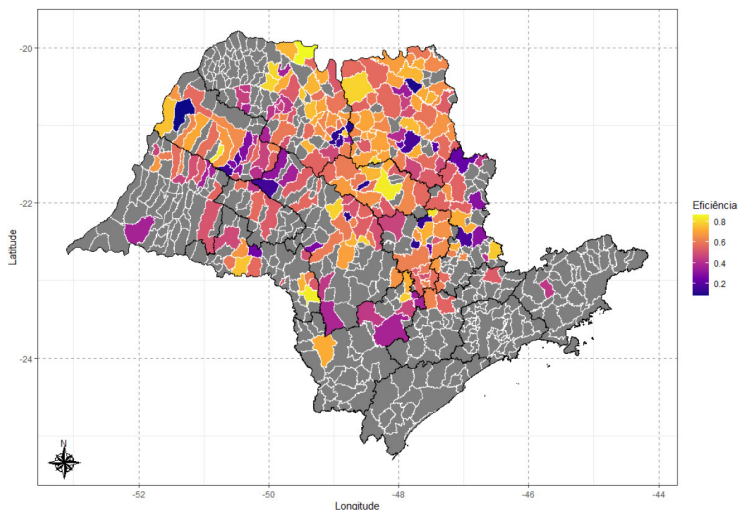


Figura 1 - Distribuição espacial das eficiências da produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo – municípios selecionados – 2017

Fonte: Resultados da pesquisa.

Por meio da Figura 1 verifica-se a existência de uma concentração de eficiências mais altas nas mesorregiões de Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e Araçatuba. A mesorregião de São José do Rio Preto apresentou uma concentração de eficiências próximas a 1, enquanto a mesorregião de Araçatuba parece ter eficiências mais próximas a zero. A Tabela 2 mostra a frequência dentro de cada faixa de classificação das eficiências para as mesorregiões do estado de São Paulo.

Tabela 2 - Classificação das eficiências calculadas para as mesorregiões do estado de São Paulo em 2017 – número de municípios e participação percentual

Mesorregiões	Baixa ($< 0,5$)	Regular ($\geq 0,5$ e $< 0,8$)	Alta ($\geq 0,8$ e < 1)	Eficiente ($= 1$)
Araçatuba	9 (38%)	14 (58%)	1 (4%)	0 (0%)
Araraquara	1 (7%)	13 (87%)	1 (7%)	0 (0%)
Assis	1 (8%)	10 (83%)	1 (8%)	0 (0%)
Bauru	7 (30%)	15 (65%)	1 (4%)	0 (0%)
Campinas	6 (32%)	13 (68%)	0 (0%)	0 (0%)
Itapetininga	5 (63%)	3 (38%)	0 (0%)	0 (0%)
Macro Metropolitana Paulista	0 (0%)	2 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Marília	2 (50%)	2 (50%)	0 (0%)	0 (0%)
Piracicaba	4 (22%)	13 (72%)	1 (6%)	0 (0%)
Presidente Prudente	5 (38%)	8 (62%)	0 (0%)	0 (0%)
Ribeirão Preto	8 (15%)	45 (82%)	2 (4%)	0 (0%)
São José do Rio Preto	12 (26%)	31 (67%)	3 (7%)	0 (0%)
Vale do Paraíba Paulista	1 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Fonte: Resultados da pesquisa.

As mesorregiões de São José do Rio Preto, Araçatuba, Ribeirão Preto e Bauru possuem o maior número absoluto de municípios ou DMUs com nível de eficiência baixa (inferior a 0,5). As regiões do Vale do Paraíba Paulista e Itapetininga apresentam mais da metade dos municípios na faixa de eficiência baixa (inferior a 0,5). Ribeirão Preto e São José do Rio Preto possuem a maior quantidade absoluta de municípios ou DMUs no nível de eficiência regular (entre 0,5 e 0,8). Excluindo-se a região Macro Metropolitana Paulista, as regiões de Araraquara, Assis e Ribeirão Preto são as que apresentam a maior proporção de municípios na faixa regular (entre 0,5 e 0,8) de eficiência. A região de São José do Rio Preto é a que possui a maior quantidade de municípios com eficiência alta (maior que 0,8 e menor que 1). Ressalta-se que nenhuma região apresentou uma participação maior do que 8% dos municípios na faixa de eficiência alta (maior que 0,8 e menor que 1).

Dentre algumas possibilidades a serem elencadas sobre a eficiência média regular de regiões consolidadas na produção canavieira, como Ribeirão Preto e Piracicaba (Mesquita *et al.* 2019), destacam-se o envelhecimento dos canaviais e intempéries climáticas, bem como o acesso à crédito destinado ao cultivo da cana-de-açúcar e aumento dos custos de produção, espe-

cialmente nos anos de 2015 a 2019 (Santos e Castillo 2020) que engloba os dados censitários neste estudo.

Destaca-se também que a instalação de usinas promove aos municípios rendas advindas da coleta de impostos, o que garante melhores condições socioeconômicas para o município (Santos e Castillo 2020). Bacchi e Caldarelli (2015) apontam para um crescimento do emprego e renda em municípios paulistas determinados pela expansão do setor sucroenergético entre 2005 e 2009. Tal efeito também foi observado por Moraes et al. (2016), para o período de 2000 a 2008, onde os autores estabelecem que a instalação de uma usina em um município pode repercutir benefícios por até 10 anos. As estatísticas descritivas das variáveis empregadas no modelo Tobit são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na regressão para o estado de São Paulo – municípios selecionados – 2017

Variável	Mínimo	Máximo	Média	D.P.
Agricultura familiar (%)	0,00	100,00	34,31	20,43
Assistência técnica (%)	13,50	100,00	69,80	20,09
Crédito rural (%)	0,00	90,00	60,57	10,04
Escolaridade (anos)	6,87	14,31	10,84	1,46
Idade (anos)	40,60	54,82	48,72	2,11
Mulheres (%)	0,00	45,45	8,74	8,08
Receita (%)	15,38	100,00	88,38	12,07
Técnicas de cultivo (%)	0,03	6,95	0,785	0,84
Rotação (%)	0,00	4,01	0,203	0,44
Usina	0,00	4,00	0,45	0,70

Fonte: Resultados da pesquisa.

A partir da Tabela 3 é possível observar que as variáveis “agricultura familiar” e “assistência técnica” são as que possuem maior desvio padrão e que as variáveis “técnicas de cultivo” e “usina” apresentam os maiores valores para o desvio padrão em relação à média. Os menores valores de desvio padrão em relação à média são das variáveis “idade” e “escolaridade”, sendo que para a segunda o número máximo de anos de estudo médio para os municípios analisados é de 10,84 anos, que é equivalente a um nível educacional médio de ensino superior incompleto. Além disso, a proporção de mulheres como principais responsáveis por estabelecimentos rurais é menor que 50% em to-

dos os municípios analisados, sendo que a proporção média é de pouco mais de 8% de mulheres apontadas como principais responsáveis pela produção canaveira na propriedade rural. Também é importante observar que a média de estabelecimentos rurais que possuem receita proveniente da venda de cana-de-açúcar é próxima a 90%, enquanto que a proporção média de estabelecimentos de agricultura familiar é de apenas 34%.

A baixa proporção de locais que empregam a rotação de culturas e a adoção de técnicas de cultivo pode ser explicada por fatores relacionados a características da produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Segundo Baccarin (2019), as mudanças tecnológicas do cultivo da cana decorrente da busca por práticas conservacionistas foi no sentido da construção de terraços e curvas de nível, para o controle da erosão, aumento do comprimento dos talhões, bem como na escolha de variedades genéticas mais eretas para facilitar a colheita mecanizada. Nesse sentido, apesar da rotação, plantio direto e cultivo mínimo serem técnicas importantes, não são as únicas opções para os produtores paulistas.

Foram analisados 240 municípios, dos quais 85 possuem pelo menos uma usina de etanol de cana-de-açúcar localizada em seu território, o que representa 35,4% do total de municípios da amostra. Dos 85 municípios que apresentam usinas, apenas 18 contêm mais de uma usina em seu território, o que equivale 21,2% dos municípios que contêm pelo menos uma usina ou 7,5% do total de municípios da amostra. A presença de pelo menos uma usina no território foi representada no modelo por meio da variável “usina”. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para o modelo Tobit para o estado de São Paulo, somente para as variáveis explicativas que apresentaram resultados estatisticamente significativos.

Tabela 4 - Variáveis que afetam as eficiências do modelo – resultados do modelo Tobit para o estado de São Paulo

Variável	Valor	Significância
Intercepto 1	-1,1642146	<2e-16***
Intercepto 2	-2,5045084	<2e-16***
Crédito rural	0,0014790	0,0707 ^ˆ
Usina	0,0220670	0,0549 ^ˆ
Araçatuba	0,0447536	0,0871 ^ˆ

*** nível de significância menor do que 1%, ** nível de significância menor que 5%, * nível de significância menor que 10% e ^ˆ nível de significância de 10%.

Fonte: Resultados da pesquisa.

O modelo Tobit apresenta dois interceptos, o primeiro de média e o segundo de desvio-padrão. As variáveis “usina” e “crédito” apresentaram influência positiva na eficiência, ambas com nível de significância de 10%, ou seja, quanto mais usinas um município paulista tiver e quanto mais crédito rural tiver sido usado pelos produtores rurais do município, em média, tem-se uma eficiência maior.

A importância do crédito rural nas propriedades agrícolas é apontada por Medeiros *et al.* (2017). Por meio de um modelo de correção de erros (VEC), os resultados dos autores apontam que no curto prazo existe uma influência do crédito no aumento da quantidade de máquinas e no uso de fertilizantes e, no longo prazo, influência no aumento da área plantada.

Ao contrário do encontrado neste estudo, Rodrigues *et al.* (2018) encontraram resultados indicando que a presença de usinas de etanol e açúcar influenciavam negativamente a eficiência da produção. Os próprios autores apontaram que o resultado obtido era contraintuitivo.

A mesorregião de Araçatuba, apresentou um nível médio de incremento na eficiência, com nível de significância de 10%. Entre 2003 e 2008, esta mesorregião apresentou uma das maiores expansões dos seus canaviais, o que pode configurar ainda um potencial de crescimento para o estado de São Paulo para os próximos anos (Rudorff *et al.* 2010). A influência positiva da mesorregião para o incremento médio da eficiência pode ser explicada por outros fatores e não pela presença de DMUs ou municípios com baixa eficiência, assim como mostrou o resultado descritivo.

4.2. Minas Gerais

Após a retirada dos municípios, que correspondem às DMUs na análise proposta, com falta de informações e os ajustes realizados na base de dados, a amostra final para o estado de Minas Gerais é composta por dados provenientes de 129 municípios ou DMUs, os quais possuem uma representação de 15,1% do total de municípios do estado. O estado de Minas Gerais possui 12 mesorregiões, dentre as quais 10 tinham municípios contidos na amostra. As estatísticas descritivas para o resultado da eficiência técnica da cana-de-açúcar em Minas Gerais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas das eficiências calculadas para o estado de Minas Gerais (2017)

Estatística	Eficiência (entre 0 e 1)
Valor mínimo	0,04
Valor máximo	0,92
Valor médio	0,39
Desvio Padrão	0,23

Fonte: Resultados da pesquisa.

Conforme pode ser observado na Tabela 5, a média das eficiências é de 0,39, enquanto o menor valor calculado para a eficiência foi de 0,04 e o maior valor foi de 0,92. A Figura 2 apresenta o mapa com a distribuição espacial das eficiências calculadas para os municípios do estado de Minas Gerais com dados para o ano de 2017.

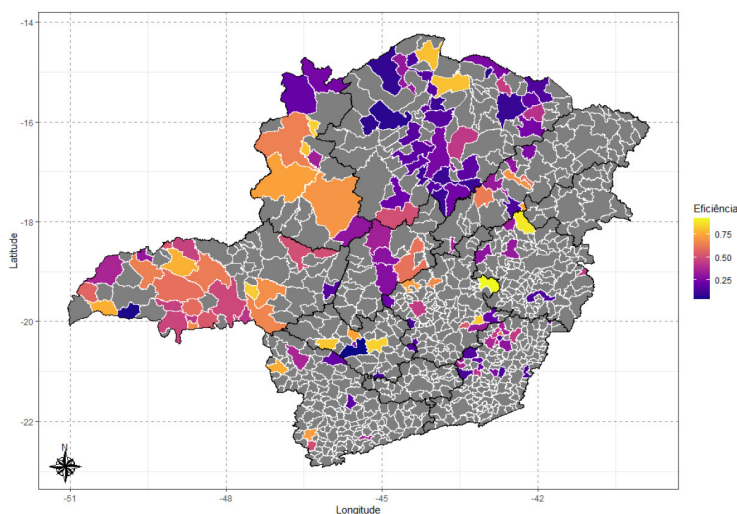


Figura 2 - Distribuição espacial das eficiências da produção de cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais – municípios selecionados – 2017

Fonte: Resultados da pesquisa.

Por meio da Figura 2 observa-se que é possível que haja uma concentração das eficiências mais elevadas nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas. É também interessante notar que as

regiões que parecem ter uma influência positiva com relação a eficiência são limítrofes ao estado de São Paulo e próximas a mesorregião de São José do Rio Preto e Ribeirão Preto. Castanho e Souto (2013) argumentam que as condições edafoclimáticas dessas mesorregiões interestaduais são condicionantes-chave para o desenvolvimento do cultivo nessas áreas. A Tabela 6 apresenta a classificação das eficiências para as mesorregiões do estado de Minas Gerais.

Tabela 6 - Classificação das eficiências calculadas com respeito a cada mesorregião do estado de Minas Gerais em 2017 – número de municípios e participação percentual

Mesorregiões	Baixa ($< 0,5$)	Regular ($\geq 0,5$ e $< 0,8$)	Alta ($\geq 0,8$ e < 1)	Eficiente (= 1)
Metropolitana de Belo Horizonte	6 (55%)	3 (27%)	2 (18%)	0 (0%)
Central Mineira	3 (75%)	1 (25%)	0 (0%)	0 (0%)
Jequitinhonha	6 (60%)	4 (40%)	0 (0%)	0 (0%)
Noroeste de Minas	4 (44%)	3 (33%)	2 (22%)	0 (0%)
Norte de Minas	26 (90%)	2 (7%)	1 (3%)	0 (0%)
Oeste de Minas	4 (57%)	1 (14%)	2 (29%)	0 (0%)
Sul/Sudoeste de Minas	4 (57%)	3 (43%)	0 (0%)	0 (0%)
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	11 (44%)	13 (52%)	1 (4%)	0 (0%)
Vale do Rio Doce	5 (83%)	0 (0%)	1 (17%)	0 (0%)
Zona da Mata	18 (95%)	1 (5%)	0 (0%)	0 (0%)

Fonte: Resultados da pesquisa.

As mesorregiões de Belo Horizonte, Noroeste de Minas e Oeste de Minas são as que possuem maior quantidade de municípios altamente eficientes (maiores que 0,8 e menores do que 1). As mesorregiões do Norte de Minas e da Zona da Mata possuem as maiores quantidades de municípios com eficiência baixa (inferiores a 0,5), enquanto Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Sul/Sudoeste de Minas e Jequitinhonha possuem as maiores proporções de usinas na faixa regular (entre 0,5 e 0,8) de eficiência técnica. As estatísticas descritivas das variáveis empregadas no modelo Tobit são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Estatística descritiva das variáveis utilizadas na regressão de Minas Gerais – municípios selecionados – 2017

Variável	Mínimo	Máximo	Média	D.P.
Agricultura familiar (%)	0,00	100,00	63,32	28,02
Assistência técnica (%)	0,38	94,10	33,52	22,91
Crédito rural (%)	7,80	85,71	42,87	12,36
Escolaridade (anos)	7,57	25,48	14,16	2,88
Idade (anos)	45,74	55,51	48,85	1,68
Mulheres (%)	0,00	36,36	10,11	9,02
Receita (%)	7,52	98,75	47,04	24,84
Técnicas de cultivo (%)	0,16	46,09	8,21	9,03
Rotação (%)	0,00	4,66	0,54	0,92
Usina	0,00	4,00	0,22	0,57

Fonte: Resultados da pesquisa.

A variável “usina” é a única que possui desvio padrão maior que a média, sendo que dentre os municípios de Minas Gerais analisados somente cinco apresentaram mais que 1 usina no seu território e somente 16,3% dos municípios da amostra possuíam ao menos 1 usina. A proporção de agricultores familiares é maior do que em São Paulo, sendo que a média é de 63%. A proporção de mulheres responsáveis pelos estabelecimentos rurais é em média de, apenas, 10%. Quanto ao uso de crédito rural, a maior proporção é de 85,71% no município de Maria da Fé. A proporção de estabelecimentos em cada município que possuem renda proveniente da venda de cana-de-açúcar é menor do que a do estado de São Paulo, sendo em média de 47% em Minas Gerais.

Assim como o estado de São Paulo, há uma baixa proporção de municípios onde são adotadas técnicas de cultivo como o cultivo mínimo e plantio direto ou que plantam outras culturas além da cana-de-açúcar.

As variáveis cujas estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 8 foram utilizadas para calcular o modelo Tobit. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no cálculo do modelo Tobit para Minas Gerais somente para as variáveis explicativas que apresentaram resultados estatisticamente significativos.

Tabela 8 - Resultados do modelo Tobit para o estado de Minas Gerais – municípios selecionados – 2017

Variável	Valor	Significância
Intercepto 1	-0,916884	<2e-16***
Intercepto 2	-0,467420	4,27e-07***
Usina	0,403616	0,0123*
Técnicas de cultivo	-0,015878	0,0292*

*** nível de significância menor do que 1%, ** nível de significância menor que 5%, * nível de significância de 5% e " nível de significância de 10%.

Fonte: Resultados da pesquisa.

A influência negativa de técnicas de cultivo para eficiência técnica da produção, pode ser reflexo da heterogeneidade da produção no estado. Além disso, a modernização da colheita por meio da mecanização em substituição à queimada e corte manual não ocorreu na mesma intensidade em outras regiões do país como no estado de São Paulo (Torquato, Fronzaglia e Martins 2008).

Em consonância com os resultados obtidos para o estado de São Paulo, há, em média, um acréscimo na eficiência para aqueles estabelecimentos localizados em municípios que possuem usinas, embora apenas 20% dos municípios mineiros tenham presença de usinas. Ressalta-se que Minas Gerais é um importante polo na produção de cachaça de alambique, sendo responsável por 50% da fabricação total dessa bebida no país (Paiva e Brito 2018). Como usinas e destilarias possuem um forte vínculo comercial (Siqueira e Reis 2006), a produção destinada às destilarias pode ser beneficiada pela presença de usinas na região.

4.3. Goiás

Após retirar-se da amostra os municípios com informações faltantes e realizar os ajustes, a amostra final para o estado de Goiás é composta por informações provenientes de 42 municípios, que representa uma proporção de 17,1% do número total de municípios do estado. O estado de Goiás possui 5 mesorregiões sendo que 4 delas contaram com ao menos 1 município na amostra analisada.

A Tabela 9 apresenta as estatísticas descritivas das eficiências calculadas por meio do modelo DEA-CCR orientado aos insumos para o estado de Goiás.

Tabela 9 - Estatísticas descritivas das eficiências calculadas para o estado de Goiás (2017)

Estatística	Eficiência (entre 0 e 1)
Valor mínimo	0,07
Valor máximo	0,85
Valor médio	0,46
Desvio Padrão	0,22

Fonte: Resultados da pesquisa.

A média das eficiências é menor que 0,5, mostrando a predominância de DMUs ou municípios com baixas eficiências em Goiás. A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das eficiências calculadas para os municípios do estado de Goiás para o ano de 2017.

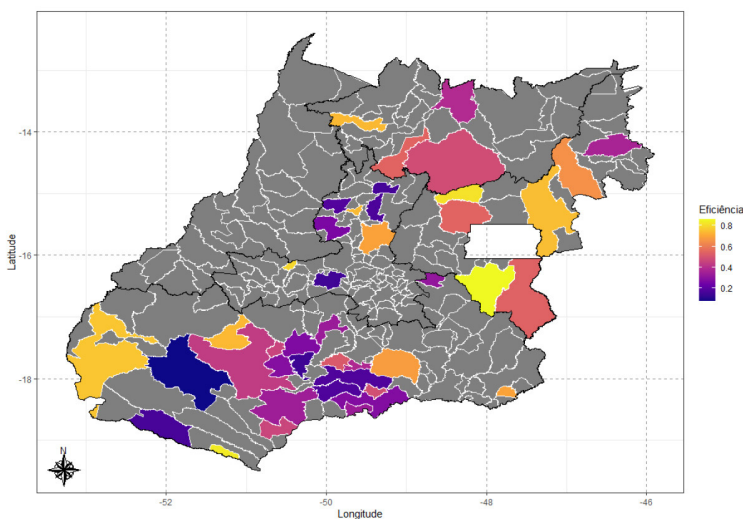


Figura 3 - Distribuição espacial das eficiências da produção de cana-de-açúcar no estado de Goiás – municípios selecionados – 2017

Fonte: Resultados da pesquisa.

Por meio da Figura 3 é possível aventar a hipótese de uma concentração de DMUs mais eficientes na mesorregião do Leste Goiano. É ainda interessante notar que não há grande participação de municípios localizados na região leste da mesorregião Centro-Sul e no Noroeste de Goiás. A Tabela 10 apresenta a classificação das eficiências para cada mesorregião do estado de Goiás.

Tabela 10 - Classificação das eficiências calculadas para cada mesorregião do estado de Goiás em 2017 – número de municípios e participação percentual

Mesorregiões	Baixa ($< 0,5$)	Regular ($\geq 0,5$ e $< 0,8$)	Alta ($\geq 0,8$ e < 1)	Eficiente (= 1)
Centro Goiano	4 (57%)	3 (43%)	0 (0%)	0 (0%)
Leste Goiano	1 (14%)	4 (57%)	2 (29%)	0 (0%)
Norte Goiano	2 (50%)	2 (50%)	0 (0%)	0 (0%)
Sul Goiano	17 (74%)	6 (26%)	0 (0%)	0 (0%)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota-se que a mesorregião do Sul Goiano é a que possui maior quantidade e percentual de municípios com eficiência baixa (menores do que 0,5), apesar de apresentar a maior quantidade bruta de municípios com eficiência regular (entre 0,5 e 0,8), e o Leste Goiano é a que possui a maior quantidade e percentual de municípios com eficiência nas faixas regular (entre 0,5 e 0,8) e alta (superiores a 0,8 e inferiores a 1). Em destaque, o Sul Goiano, que é consolidado na produção canavieira (Barbalho 2013) apresentou a maior quantidade de municípios ou DMUs com eficiência baixa (inferior a 0,5). Em contrapartida à elevada concentração de municípios ou DMUs na faixa baixa (inferior a 0,5), há também uma grande quantidade de municípios ou DMUs na faixa regular (entre 0,5 e 0,8), sendo que a única mesorregião com eficiência alta (superior a 0,8 e inferior a 1) é o Leste Goiano, com apenas 2 DMUs. As estatísticas descritivas das variáveis empregadas no modelo Tobit são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Estatística descritiva das variáveis utilizadas na regressão do estado de Goiás - municípios selecionados - 2017

Variável	Mínimo	Máximo	Média	D.P.
Agricultura familiar (%)	0,00	100,00	44,05	37,73
Assistência técnica (%)	3,85	100,00	49,02	33,95
Crédito rural (%)	0,00	58,73	28,36	16,74
Escolaridade (anos)	9,21	17,13	11,78	1,72
Idade (anos)	46,34	51,22	49,21	1,09
Mulheres (%)	0,00	62,50	6,72	11,84
Receita (%)	18,75	100,00	73,58	25,43
Técnicas de cultivo (%)	2,08	183,04	45,16	45,43
Rotação (%)	0,00	143,36	15,49	26,42
Usina	0,00	2,00	0,50	0,67

Fonte: Resultados da pesquisa.

No estado de Goiás, quatro municípios possuem mais do que uma usina instalada, sendo que a proporção de municípios que possuem ao menos uma usina é de 40,47%. A proporção média de mulheres responsáveis por estabelecimentos rurais é a menor dentre os estados avaliados, sendo de apenas 6,7%. A proporção da receita proveniente da venda de cana-de-açúcar nos municípios é superior a 70%, apenas menor que a de São Paulo. A proporção de estabelecimentos nos municípios que usufruem de crédito rural é a menor dentre os estados analisados, sendo de 28,4%. A partir dos dados apresentados na Tabela 11 foi feita uma regressão para estabelecer os determinantes das eficiências por meio de um modelo Tobit. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para o modelo Tobit em Goiás.

É interessante prestar atenção aos valores máximos de “técnicas de cultivo” e “rotação”, sendo estes superiores a 100%. Isto quer dizer que alguns municípios possuem uma concentração de outras culturas que utilizam plantio direto ou cultivo mínimo ou então possuem predominantemente soja e amendoim em suas áreas. Todas as variáveis são as médias dos estabelecimentos do município, portanto pode haver alguns estabelecimentos que foram incluídos nessa variável e não tem como fonte principal de renda a cana-de-açúcar, apesar dos municípios analisados serem referentes à produção canavieira.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados do modelo Tobit para o estado de Goiás, somente para as variáveis explicativas que apresentaram resultados estatisticamente significativos.

Tabela 12 - Resultados do modelo Tobit para o estado de Goiás – municípios selecionados – 2017

Variável	Valor	Significância
Intercepto 1	3,0944	<2e-16***
Intercepto 2	-0,71093	1,35e-05***
Leste Goiano	0,5839	0,0958 ^ˆ

*** nível de significância menor do que 1%, ** nível de significância de 1%, * nível de significância de 5% e ^ˆ nível de significância de 10%.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados do modelo Tobit mostram que a variável “Leste Goiano” foi a única que mostrou efeito estatisticamente significativo sob a eficiência dos municípios de Goiás, sendo este positivo. A mesorregião “Leste Goiano” pode estar apontando como determinante da eficiência, pela maior incidência de DMUs eficientes, isso pode ser explicado pelo fato de serem DMUs mais novas, com mais tecnologia empregada. Adicionalmente, é possível contar com a presença de uma logística atualmente favorável, pela proximidade com o Distrito Federal.

Diante desse resultado, é ainda possível propor a hipótese de que a crise desse setor impediu que a tradicional região do Centro-Sul goiano obtivesse resultados mais bem ranqueados para a eficiência técnica, sendo que entre 1985 e 2006 esses índices já estavam em queda (Souza e Teixeira 2014). Neves e Mendonça (2020) destacam que o Centro-Sul foi a região que iniciou o processo de expansão do agronegócio canavieiro em Goiás. A região Centro-Sul (a que tem maior incidência de produção de cana-de-açúcar, conforme pode ser visto na Figura 3) tem sido coordenada para abarcar um sistema logístico com a construção de um etanol-duto, que seria interligado diretamente ao porto de Paulínia – SP (Neves e Mendonça 2020).

O estado de Goiás tem apresentado uma virada tecnológica nos últimos anos, o que gerou uma elevada heterogeneidade de sua produção (Vieira, Buainain e Contini 2014). Cabe ainda destacar que, somente a partir de 2005, a região Centro-Oeste brasileira iniciou a efetiva expansão da produção de cana-de-açúcar (Alves *et al.* 2021), ao contrário dos estados de

São Paulo e Minas Gerais, cuja expansão da cultura é mais antiga e foi fortemente impulsionada pelo Proálcool.

Segundo dados da UNICA (2023), Goiás é o terceiro estado com maior valor exportado de etanol na safra de 2020/2021. Esta relevância não se reflete nos dados analisados, vale ressaltar que somente a partir da safra de 2018 que o estado de Goiás começou a ocupar as posições de segundo e terceiro no ranking, alternando sua quantidade de etanol exportado com Minas Gerais e Pernambuco e valor exportado com o Paraná.

4.4. Mato Grosso

Após a retirada dos municípios com falta de informações e das adequações feitas na base de dados, a amostra final para o estado do Mato Grosso é composta de dados provenientes de 18 municípios, cada um deles analisado como uma DMU, correspondendo a 18,1% do total de municípios existentes no estado. Cabe ressaltar que o estado de Mato Grosso possui cinco mesorregiões sendo que todas contaram com ao menos um município na amostra analisada.

A Tabela 13 demonstra as estatísticas descritivas das eficiências técnicas calculadas por meio do modelo DEA-CCR orientado aos insumos para os municípios do estado de Mato Grosso.

Tabela 13 - Estatísticas descritivas das eficiências calculadas para o estado de Mato Grosso (2017)

Estatística	Eficiência (entre 0 e 1)
Valor mínimo	0,17
Valor máximo	0,92
Valor médio	0,57
Desvio Padrão	0,23

Fonte: Resultados da pesquisa.

Embora não existam municípios com eficiências entre 0,6 e 0,7, a média das eficiências técnicas dos municípios é de 0,57, que está dentro da faixa de eficiência regular (entre 0,5 e 0,8). A Figura 4 apresenta as eficiências calculadas separadas por mesorregião para a amostra de municípios pertencentes ao estado de Mato Grosso com dados do Censo Agropecuário 2017.

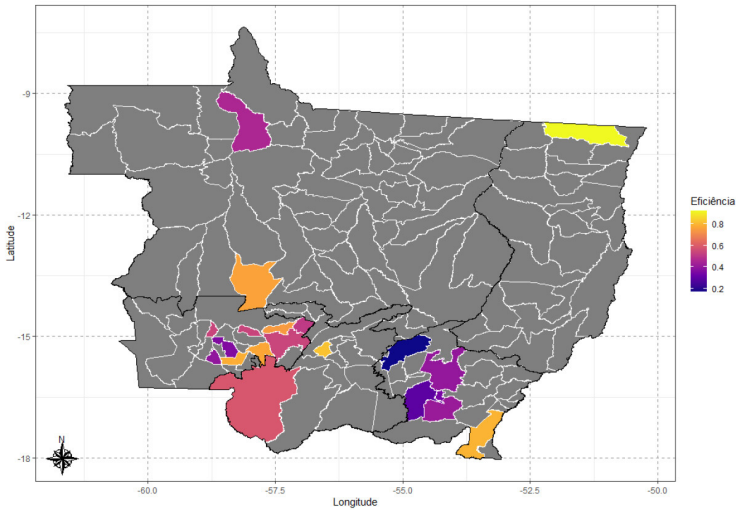


Figura 4 - Distribuição espacial das eficiências da produção de cana-de-açúcar no estado de Mato Grosso – municípios selecionados – 2017

Fonte: Resultados da pesquisa.

Por meio da Figura 4, é possível observar que a mesorregião do Sudoeste Mato-Grossense parece ter uma concentração de municípios com eficiência abaixo de 0,5. A Tabela 14 apresenta a classificação das eficiências para cada mesorregião do estado de Mato Grosso.

Tabela 14 - Classificação das eficiências calculadas para cada mesorregião do estado de Mato Grosso em 2017 – número de municípios e participação percentual

Mesorregiões	Baixa ($< 0,5$)	Regular ($\geq 0,5$ e $< 0,8$)	Alta ($\geq 0,8$ e < 1)	Eficiente (= 1)
Centro-Sul Mato-Grossense	0 (0%)	1 (50%)	1 (50%)	0 (0%)
Nordeste Mato-Grossense	0 (0%)	0 (0%)	1 (100%)	0 (0%)
Norte Mato-Grossense	1 (50%)	0 (0%)	1 (50%)	0 (0%)
Sudoeste Mato-Grossense	2 (29%)	5 (71%)	0 (0%)	0 (0%)
Sudeste Mato-Grossense	5 (83%)	0 (0%)	1 (17%)	0 (0%)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Dentre as mesorregiões, o Sudoeste Mato-Grossense é o único que não possui municípios com eficiência alta (superiores a 0,8 e inferiores a 1). As estatísticas descritivas das variáveis empregadas no modelo Tobit são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na regressão de Mato Grosso - municípios selecionados - 2017

Variável	Mínimo	Máximo	Média	D.P.
Agricultura familiar (%)	0,00	100,00	66,45	41,33
Assistência técnica (%)	1,70	84,03	22,81	21,14
Crédito rural (%)	0,00	100,00	55,29	27,92
Escolaridade (anos)	4,47	6,84	5,40	0,63
Idade (anos)	45,90	59,22	49,94	3,17
Mulheres (%)	0,00	40,00	15,08	13,60
Receita (%)	19,23	100,00	67,06	25,55
Técnicas de cultivo (%)	0,59	441,72	118,64	112,05
Rotação (%)	0,00	104,44	14,72	26,68
Usina	0,00	1,00	0,22	0,48

Fonte: Resultados da pesquisa.

A variável “Usina” apresentou a maior variação relativa dentre todas as variáveis sendo duas vezes maior que a média. Na amostra do estudo existe uma proporção de 22% de municípios com uma usina. A média da proporção de agricultores familiares é a maior dentre os estados analisados (66,5%), enquanto a média da proporção de estabelecimentos que utilizam crédito rural é a menor (22,8%). O desvio-padrão da variável “idade” é o maior dentre todos os estados analisados (3,17 anos). A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para os fatores que determinam a eficiência técnica, calculado por meio do modelo Tobit, para o estado do Mato Grosso, somente para as variáveis explicativas significativas

Tabela 16 - Resultados do modelo Tobit para o estado de Mato Grosso – municípios selecionados – 2017

Variável	Valor	Significância
Intercepto 1	1,6730	<2e-16***
Intercepto 2	-1,0585	4,12e-05***
Sudeste Mato-Grossense	-0,5339	0,033*

*** nível de significância menor do que 1%, ** nível de significância de 1%, * nível de significância de 5% e " nível de significância de 10%.

Fonte: Resultados da pesquisa.

A única variável inserida no modelo que apresentou resultados estatisticamente significativos foi a mesorregião do Sudeste Mato-Grossense, sendo que, em média, há um decréscimo na eficiência para os municípios dessa mesorregião. Este resultado é reflexo da alta concentração de DMUs com eficiência baixa (83%) nesta mesorregião. A baixa quantidade de graus de liberdade da estimação também pode ter influenciado nos resultados obtidos.

4.5. Considerações finais

A partir da análise apresentada foi possível observar diferenças significativas na distribuição da eficiência para cada um dos estados desta análise. Com relação a variação da média da eficiência técnica nos estados analisados, São Paulo apresentou índices maiores com menor variação nos municípios, em contraposição à Minas Gerais, que apresentou índices de eficiência menores, mas com um desvio-padrão superior. A principal diferença em termos de caracterização produtiva entre os dois estados está relacionada à participação da agricultura familiar e à assistência técnica. Cabe destacar que Minas Gerais apresenta aproximadamente o dobro da participação da agricultura familiar na produção em comparação com São Paulo, enquanto São Paulo exibe cerca do dobro da participação de estabelecimentos que recebem assistência técnica em relação a Minas Gerais.

Quanto às mesorregiões analisadas, percebe-se a similaridade entre São José do Rio Preto e do Triângulo Mineiro, sendo estas as que apresentam maior concentração de DMUs com alta eficiência em seus respectivos es-

tados, São Paulo e Minas Gerais. Enquanto Minas Gerais e São Paulo possuem uma concentração de DMUs com eficiência alta, em Goiás, a fronteira dos mais eficientes fica próxima ao Norte de Minas Gerais, O Mato Grosso fica relativamente isolado ao centro de difusão tecnológica da cana-de-açúcar.

Além disso, a mesorregião do Centro-Sul Goiano não foi determinante para explicar a eficiência no estado de Goiás. Constatou-se que é possível aventar duas hipóteses, sendo a primeira explicada pela incipiência da região no ano de 2017 e a segunda pelas crises climáticas e de infraestrutura que o setor enfrentou entre 2013 e 2017.

Cabe ressaltar que a baixa quantidade de DMUs analisadas, tanto em Goiás quanto em Mato Grosso, pode ter afetado o resultado do modelo. Apesar desta limitação, é possível observar importantes resultados quanto ao tipo de ambiente produtivo pelas eficiências e estatísticas descritivas apresentadas. O Mato Grosso apresentou a maior média de eficiência técnica. Apresentou também uma grande participação da agricultura familiar na produção e alta taxa de participação do crédito rural. Minas Gerais teve resultado oposto.

No estado de São Paulo, a adoção das técnicas de cultivo é muito baixa, isso pode ser explicado pelo uso intensivo de máquinas para o cultivo, além das condições edafoclimáticas favoráveis. Por outro lado, Minas Gerais apresentou como determinante negativo a adoção das técnicas de cultivo.

Finalmente, de forma geral para o cultivo de cana-de-açúcar nas regiões analisadas, as variáveis que se mostraram mais significativas do ponto de vista estatístico para explicar a eficiência técnica foram a localização geográfica do cultivo, a presença de usinas no entorno, as técnicas de cultivo empregadas e a participação do crédito rural.

5. Conclusão

O objetivo deste estudo foi calcular a eficiência técnica da produção de cana-de-açúcar através de um modelo DEA-CCR com orientação aos insumos para uma amostra de municípios dos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso no ano de 2017. Complementarmente, foram analisadas, através de um modelo Tobit, as variáveis socioeconômicas que influenciam as eficiências da produção de cana-de-açúcar em cada um destes estados.

A contribuição deste estudo em relação à literatura sobre o assunto está nas análises regionais realizadas e, principalmente, na inclusão de estados menos explorados na literatura como Minas Gerais e Mato Grosso. Nota-se que São Paulo é o único estado que apresenta nível significativo para o crédito rural e impactado positivamente por esse componente. Sendo isso independente das diferenças nas políticas em 2017. Além disso, o efeito da presença de usinas ser somente determinante para os estados de São Paulo e Minas Gerais denota a incipiência dos outros estados na análise quanto à produção de etanol, mas o potencial em que essas regiões possuem, sendo necessário o enfoque nos estudos nas áreas de expansão.

No sentido de uma política focando na produção de combustíveis renováveis, é preciso considerar os diferentes aspectos produtivos e socioeconômicos de cada região, enfocando incentivos fiscais e subsidiários, recursos naturais locais e condições da terra, mão de obra, bem como a infraestrutura e políticas em prol da produção sustentável.

Para estudos futuros sugere-se que outras variáveis sejam utilizadas, como preço da cana-de-açúcar e do etanol, quantidade de tratores, bem como, o uso de informações primárias, tanto com respeito às propriedades rurais quanto, principalmente, às usinas. Além disso, a adição de variáveis que quantificassem os impactos ambientais poderia ser importante para avaliar a eficiência ambiental na produção de etanol e cana-de-açúcar brasileira, sendo que não foram incluídas pela dificuldade em modelar tais variáveis.

Referências

- Alves, Lázaro Quintino, Petrus Narciso Franco, Willian Aparecido Leoti Zanetti, e Bruno César Góes. 2021. “Desempenho Da Produção Da Cultura de Cana-de-Açúcar Nos Principais Estados Produtores.” *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas* 15 (2): 303–3017. <https://doi.org/https://doi.org/10.18011/bioen-2021v15n2p303-317>.
- Ambetsa, Francis Lekololi, Samuel Chege Mwangi, e Samuel Njiri Ndirangu. 2020. “Technical Efficiency e Its Determinants in Sugarcane Production among Smallholder Sugarcane Farmers in Malava Sub-County, Kenya.” *African Journal of Agricultural Research* 15 (3): 351–60.
- ANP. 2020. “Painel Dinâmico de Produtores de Etanol.” 2020. <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/etanol/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol>. Acesso em 03 mar. 2023.
- Baccarin, José Giacomo. 2019. “Efeitos Ambientais, Sociais e Econômicos de Mudanças Tecnológicas Recentes Na Cana-de-Açúcar No Estado de São Paulo, Brasil.” *PEGADA - A Revista Da Geografia Do Trabalho* 20 (3): 141–73. <https://doi.org/10.33026/peg.v3i20.6559>.
- Bacchi, Mirian Rumenos Piedade, e Carlos Eduardo Caldarelli. “Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, entre 2005 e 2009.” *Nova economia* 25 (2015): 209-224.
- Balbino, V. A., C. C. Souza, e D. M. Frainer. 2020. “Análise Da Eficiência Das Indústrias de Açúcar e Alcool Com a Análise Envoltória de Dados.” *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* 11 (1): 351–61. <https://doi.org/http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0032>.
- Barbalho, Maria Gonçalves da Silva. 2013. “A Expansão Da Área de Cultivo Da Cana-de-Açúcar Na Região Sul Do Estado de Goiás de 2001 a 2011.” *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, no. 29: 98–110.
- Cardoso, Terezinha F, Marcos D. B. Watanabe, Alexandre Souza, Mateus Ferreira Chagas, Otávio Cavalett, Edvaldo Rodrigo Morais, Luiz A. Horta Nogueira, Manoel Regis Lima Verde Leal, Luiz Cortez, e Antonio Bonomi. 2019. “A Regional Approach to Determine Economic, Environmental and Social Impacts of Different Sugarcane Production Systems in Brazil.” *Biomass e Bioenergy* 120 (January): 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.018>.
- Carmo, MS do, e M. M. de Magalhães. “Agricultura sustentável: avaliação da eficiência técnica e econômica de atividades agropecuárias selecionadas no sistema não convencional de produção.” *Informações Econômicas* 29.7 (1999): 7-98.
- Castanho, Roberto Barboza, e Thales Silveira Souto. 2013. “Produção de Cana-de-Açúcar Na Mesorregião Do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil.” *Brazilian Geographical Journal* 4 (1): 27–54.
- Charnes, A., W. W. Cooper, e E. Rhodes. 1978. “Measuring the Efficiency of Decision Making Units.” *European Journal of Operational Research* 2 (6): 429–44. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).
- Coelli, Timothy, D. S. Prasada Rao, e George E. Battese. 1998. *An Introduction to Efficiency e Productivity Analysis*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5493-6>.
- CONAB. 2020. “Safrá Brasileira de Cana-de-Açúcar.” 2020. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em 25 abr. 2023.
- Cooper, William W., Lawrence M. Seiford, e Joe Zhu. 2011. “Data Envelopment Analysis: History, Models, e Interpretations.” In *Handbook on Data Envelopment Analysis*, edited by Springer, 1–39. Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6151-8_1.
- Danelon, André Felipe, Humberto Francisco Silva Spolador, e Jason Scott Bergtold. “The role of productivity and efficiency gains in the sugar-ethanol industry to reduce land expansion for sugarcane fields in Brazil.” *Energy Policy* 172 (2023): 113327.
- Domingues, Alex Torres. 2011. “O Setor Agroindustrial Canavieiro No Mato Grosso Do Sul: Desdobramentos e Perspectivas.” *Revista Tamoios* VII (2): 21–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.12957/tamoios.2011.2237>.

- Duarte, A., A. P. Salgado Jr, S. V. Lemos, M. A. A. Souza Jr, e F. A. Antunes. 2019. "Proposal of Operating Best Practices That Contribute to the Technical Efficiency in Brazilian Sugar e Ethanol Mills." *Journal of Cleaner Production* 214 (March): 173–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.204>.
- Farrar, Donald E., e Robert R. Glauber. 1967. "Multicollinearity in Regression Analysis: The Problem Revisited." *The Review of Economics e Statistics* 49 (1): 92–107.
- Farrell, M. J. 1957. "The Measurement of Productive Efficiency [Http://Www.Jstor.Org/Stab](http://www.jstor.org/stab)." *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* 120 (3): 253–90. <http://goo.gl/AFhm2N>.
- FAO. (2022). *Agricultural production statistics 2000–2021* (60th ed.). FAO. <https://doi.org/10.4060/cc3751en>
- IBGE. 2017. "Censo Agropecuário - Resultados Definitivos." 2017. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em 20 jun. 2022.
- Júnior, Antônio Carlos Brunozi, et al. "Eficiência produtiva e análise econômica e financeira de usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo." *REVISTA AMBIENTE CONTÁBIL-Universidade Federal do Rio Grande do Norte-ISSN 2176-9036* 4.2 (2012): 74-92.
- Lemos, S. V., A. P. Salgado Jr, A. Duarte, M. A. A. Souza Jr, e F. A. Antunes. 2019. "Agroindustrial Best Practices That Contribute to Technical Efficiency in Brazilian Sugar e Ethanol Production Mills." *Energy* 177: 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.053>.
- Marin, Fábio Ricardo, Maria Leonor Lopes-Assad, Eduardo Delgado Assad, Carlos Eduardo Vian, e Marcelo Cabral Santos. 2008. "Sugarcane Crop Efficiency in Two Growing Seasons in São Paulo State, Brazil." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43 (11): 1449–55.
- Martinelli, Luiz A., Rachael Garrett, Silvio Ferraz, e Rosamond Naylor. 2011. "Sugar e Ethanol Production as a Rural Development Strategy in Brazil: Evidence from the State of São Paulo." *Agricultural Systems* 104 (5): 419–28. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.01.006>.
- Mattei, Tatiane Salette, e Pery Francisco Assis Shikida. "MODERNIZAÇÃO AGRÍCOLA DOS MUNICÍPIOS CANAVIEIROS NO BRASIL." *Revista Paranaense de Desenvolvimento-RPD* 42.141 (2021).
- McKay, Ben, et al. "The political economy of sugarcane flexing: initial insights from Brazil, Southern Africa and Cambodia." *The Journal of Peasant Studies* 43.1 (2016): 195-223.
- Medeiros, Angélica Pott, Reisoli Bender Filho, Kelmara Mendes Vieira, e Paulo Sérgio Ceretta. 2017. "Análise Do Impacto Do Crédito Rural Na Produção Agrícola Brasileira No Período 2006 - 2014." *Revista Em Agronegócio e Meio Ambiente* 10 (3). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n3p729-755>.
- Mesquita, Fernando, et al. "Hierarquias regionais no agronegócio canavieiro: movimento da fronteira e centralidade de São Paulo." *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais* 21 (2019): 329-350.
- de Moraes, Márcia Azanha Ferraz Dias, Mirian Rumenos Piedade Bacchi, and Carlos Eduardo Caldarelli. "Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000–2008): effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region." *Biomass and Bioenergy* 91 (2016): 116-125.
- Neves, Pedro Dias Mangolini, and Marcelo Rodrigues Mendonça. "Expansão do agronegócio canavieiro no sul goiano e os efeitos na produção de alimento." *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia* 44 (2020).
- O'Donnell, Christopher J. 2018. *Productivity e Efficiency Analysis*. Springer Singapore.
- Oliveira, Terezinha Bezerra Albino, Antonio Cezar Borna, Suely de Fátima Ramos Silveira, Alexandre Matos Drumond, e Mauro Wagner Oliveira. 2014. "Analyzing the Costs e Efficiency in the Sugarcane Farms Using Data Envelopment Analysis." *Custos e Agronegócio* 10 (1): 228–52.
- Paiva, André Luiz, e Mozar José Brito. 2018. "A Configuração Das Lógicas Institucionais Do Campo Da Cachaça de Alambique Em Minas Gerais." *Revista de Economia e Sociologia Rural* 56 (4): 701–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560409>.
- Pereira, Caroline Nascimento, e José Maria Ferreira Jardim Silveira. "Análise exploratória da eficiência produtiva das usinas de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil." *Revista de Economia e Sociologia Rural* 54 (2016): 147-166.

- Pereira, Nevison Amorim, e Marcelo Tavares. 2017. "Efficiency of Major Producing Regions of Sugar Cane through Data Envelopment Analysis (DEA)." *Custos e Agronegócio* 13 (Special Edition): 37–70.
- Rodrigues, Marcos Aurélio, Giovanna Miranda Mendes, Marcelo Lopes Moraes, e Paulo Fernando Cidade Araújo. 2018. "Eficiência Técnica Na Produção de Cana-de-Açúcar No Estado de São Paulo." In *Contribuição Da FAPESP Ao Desenvolvimento Da Agricultura Do Estado de São Paulo*, 414.
- Rossetto, Raffaella, Nilza Patricia Ramos, Regina Celia de Matos Pires, Mauro Alexandre Xavier, Heitor Cantarella, e Marcos Guimarães de Andrade Landell. 2022. "Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues e Way Forward." *Sugar Tech* 24 (3): 941–66. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s12355-022-01170-y>.
- Rudorff, Bernardo Friedrich Theodor, Daniel Alves Aguiar, Wagner Fernando Silva, Luciana Miura Sugawara, Marcos Adami, e Mauricio Alves Moreira. 2010. "Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data." *Remote Sensing* 2 (4): 1057–76. <https://doi.org/10.3390/rs2041057>.
- dos Santos, Henrique Faria, e Ricardo Castillo. "Vulnerabilidade territorial do agronegócio globalizado no Brasil: crise do setor sucroenergético e implicações locais." *GEOUSP Espaço e Tempo (Onne)* 24.3 (2020): 508-532.
- Scharlemann, Jörn P. W., e William F. Laurance. 2008. "How Green Are Biofuels?" *Science* 319: 43–45.
- Shapiro, S. S., e M. B. Wilk. 1965. "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)." *Biometrika* 52 (3/4): 591. <https://doi.org/10.2307/2333709>.
- Shikida, Pery Francisco Assis. 2013. "Expansão Canavieira No Centro-Oeste: Limites e Potencialidades." *Revista de Política Agrícola XXII* (2): 122–37.
- Silva, Dayana Lilliani Gallani, Daniela Londero Silva Batisti, Maykon José Giacomelli Ferreira, Fernanda Bertelis Merlini, Ricardo Botelho Camargo, e Beatriz Cervejeira Bolanho Barros Barros. 2021. "Cana-de-Açúcar: Aspectos Econômicos, Sociais, Ambientais, Subprodutos e Sustentabilidade." *Research, Society e Development* 10 (7): 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.14163>.
- Simar, Léopold, e Paul W. Wilson. 1998. "Sensitivity Analysis of Efficiency Scores: How to Bootstrap in Nonparametric Frontier Models." *Management Science* 44 (1): 49–61. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.1.49>.
- Siqueira, Paulo Henrique de Lima, e Brício dos Santos Reis. 2006. "Determinantes Da Competitividade Na Agroindústria Processadora de Cana-de-Açúcar No Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais." *Organizações Rurais & Agroindustriais* 8 (2): 202–15.
- Smeets, Edward, Martin Junginger, André Faaij, Arnaldo Walter, Paulo Dolzan, e Wim Turkenburg. 2008. "The Sustainability of Brazilian Ethanol—An Assessment of the Possibilities of Certified Production." *Biomass e Bioenergy* 32 (8): 781–813. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.005>.
- de Souza, Rafael Oliveira, e Sônia Milagres Teixeira. «PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES NA AGRICULTURA GOIANA: UMA ANÁLISE PARA AS CULTURAS DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E SOJA.» *Revista de Economia e Agronegócio* 11.2 (2013).
- Szmrecsányi, Tamás, e Eduardo Pestana Moreira. 1991. "O Desenvolvimento Da Agroindústria Canavieira Do Brasil Desde a Segunda Guerra Mundial." *Estudos Avançados* 5 (11):57-79. <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8597>. Souza, Geraldo da Silva, Eliano Gonçalves Gomes, e Eliseu Roberto de Andrade Alves. 2020. "Função de Produção Com Base Nos Microdados Do Censo Agropecuário de 2017." *Revista de Política Agrícola*, no. 4: 18.
- Sparovek, Gerd, et al. "Environmental, land-use and economic implications of Brazilian sugarcane expansion 1996–2006." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14 (2009): 285-298.
- Sueyoshi, T., e Y. Kiriwara. 1998. "Efficiency Measurement e Strategic Classification of Japanese Banking Institutions." *International Journal of Systems Science* 29 (11): 1249–63.
- Tobin, James. 1958. "Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables." *Econometrica* 26 (1): 24. <https://doi.org/10.2307/1907382>.
- Torquato, Sérgio Alves, Thomaz Fronzaglia, e Renata Martins. 2008. "Colheita Mecanizada e Adequação Da Tecnologia Nas Regiões Produtoras de Cana-de-Açúcar." In *CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE*

PESQUISA TECNOLÓGICA, 15. Campina Grande. https://www.researchgate.net/publication/228466934_Co-lheita_Mecanizada_e_Adequacao_da_Tecnologia_nas_Regioes_Produtoras_de_Cana-de-acucar.

Torquato, Sérgio Alves, Renata Martins, e Soraia de Fátima Ramos. 2009. “Cana-de-Açúcar No Estado de São Paulo: Eficiência Econômica Das Regionais Novas e Tradicionais de Produção.” *Informações Econômicas* 39 (5): 92–99.

UNICA. 2023. “EXPORTAÇÃO ANUAL DE ETANOL PELO BRASIL POR ESTADO DE ORIGEM”. <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=23>. Acesso em 10 dez. 2023.

Vedana, Roberta, et al. “Distribuição espacial da produtividade de cana-de-açúcar no Brasil.” *Revista de Política Agrícola* 28.4 (2020): 121.

Viana, Karina RO, and Ronaldo Perez. “Survey of sugarcane industry in Minas Gerais, Brazil: Focus on sustainability.” *Biomass and Bioenergy* 58 (2013): 149-157.

Vieira, Pedro Abel, Antonio Marcio Buainain, e Elisio Contini. 2014. “Goiás: Do Vazio Ao Heterogêneo.” In *Um Olhar Territorial Para o Desenvolvimento: Centro-Oeste*, 521. Rio de Janeiro: BNDES. www.bndes.gov.br/biblioteca/digital.

Wooldridge, J. M. 2012. *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. Edited by South Western Educational Publishing. 5°. Michigan.