

# EFICIÊNCIA TÉCNICA NA PRODUÇÃO DE ETANOL: UMA ABORDAGEM REGIONAL

Technical efficiency in ethanol production: A regional approach

Luisa Fancelli Coelho

Mestra em Economia

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil

fancelli\_luisa@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9440-4887> 

Cassiano Bragagnolo

Professor associado do Departamento de Economia

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil

cassiano@ufscar.br

<https://orcid.org/0000-0002-9177-3791> 

## RESUMO

A produção de etanol tem ganhado importância no mercado internacional devido à crescente demanda por fontes de energias limpas e o gradual aumento da preocupação com a redução de gases de efeito estufa. O Brasil é um polo relevante na produção dessa *commodity*, sendo o segundo maior produtor mundial do produto. Diante da importância econômica, social e ambiental da produção de etanol, realizou-se uma análise de eficiência realizada por meio de análise envoltória de dados (*data envelopment analysis* – DEA). O objetivo deste estudo foi calcular as eficiências das usinas de etanol de cana-de-açúcar para o ano de 2018, por meio de dados divulgados para as empresas do setor pela revista Exame e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Embora existam usinas eficientes tanto no Paraná quanto em Minas Gerais, os resultados apontaram que as usinas localizadas no estado de São Paulo se destacam, estando predominantemente nas faixas de eficiência acima de 0,5. A Usina Santa Isabel e a Delta Sucroenergia, em São Paulo e Minas Gerais, respectivamente, são as que apresentaram mais relações de *benchmarking* com as usinas que não atingiram o nível máximo de eficiência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Etanol. DEA. Brasil.

## ABSTRACT

Ethanol production has gained importance in the international market due to the growing demand for clean energy sources and the gradual increase in concern with the reduction of greenhouse gases. Brazil is a relevant center in the production of this commodity, being the world's second largest producer of ethanol. Given the economic, social, and environmental importance of ethanol production, we carried out an efficiency analysis through data envelopment analysis (DEA). The objective of the study was to calculate the efficiencies of sugarcane ethanol plants for the year 2018, through data disclosed from companies in the sector by Exame magazine and by the National Agency of Petroleum, Natural Gas – ANP. Although there are efficient plants in both Paraná and Minas Gerais, the results showed that ethanol plants in the state of São Paulo stand out, being predominantly in the efficiency ranges above 0.5. In addition, Usina Santa Isabel and Delta Sucroenergia, in São Paulo and Minas Gerais, respectively, are the ones benchmarking with non-efficient plants.

**KEYWORDS:** Ethanol. DEA. Brazil.

**Classificação JEL:** C60 Q16 Q29

Recebido em: 27-08-2021. Aceito em: 14-02-2022.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético brasileiro expandiu sua produção após a crise financeira de 2008, quando houve uma descentralização no setor que impulsionou as exportações, resultando na geração de incentivos para a produção de etanol e, também, na diversificação da produção das usinas que incluiu, por exemplo, a cogeração de eletricidade (RODRIGUES; ROSS, 2020). A produção de etanol de cana-de-açúcar tem algumas características que garantem competitividade nacional e internacional ao setor sucroenergético brasileiro. Alguns destas características são: i) a possibilidade do gestor escolher o *mix* de produção entre açúcar ou etanol, reduzindo incertezas (OLIVEIRA; RIBEIRO; CICOGNA, 2018); ii) a presença de características biofísicas do país favoráveis à produção do produto, como solo, índice pluviométrico e temperatura, e; iii) o fato da cana-de-açúcar ser uma das matérias-primas mais eficientes em converter açúcar em etanol (SCHARLEMANN; LAURANCE, 2008).

Apesar do desempenho positivo e das vantagens competitivas internacionais, o setor sucroenergético brasileiro ainda possui debilidades que precisam ser superadas. Considerando a produção de etanol, em específico, é necessário levar em consideração, por exemplo, a natureza perene da cana-de-açúcar (GRANCO et al., 2017; PEREIRA; SILVEIRA, 2016). Destaca-se que o setor sucroenergético precisa de investimentos em capacidade produtiva e na produção da cana-de-açúcar para manter sua competitividade (MILANEZ et al., 2015; RODRIGUES; ROSS, 2020). Além disso, existe a possibilidade de aumentar a competitividade internacional do setor por meio da elevação da eficiência na produção, ou seja, produzindo uma quantidade maior de produto com redução ou estabilidade no uso de insumos (O'DONNELL, 2018), o que geraria uma exploração economicamente mais vantajosa (TORQUATO; MARTINS; RAMOS, 2009).

A Análise Envoltória de Dados, muitas vezes referida na literatura pelo 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). A DEA é uma técnica de programação linear que calcula a eficiência relativa de uma determinada amostra de DMUs construindo uma fronteira relativa de produção entre elas (COELLI; RAO; 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 para produzir um nível fixo de produto.

Assim, o objetivo deste estudo é calcular as eficiências das usinas de etanol de cana-de-açúcar, por meio de dados obtidos a partir de informações divulgadas para as empresas do setor pela revista Exame para o ano de 2018 (EXAME, 2019) e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020a). Para tanto, será utilizada a abordagem DEA, com orientação para os insumos e retornos constantes de escala, conhecida como DEA-CCR ou DEA-CRS (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978).

Existem diversos estudos internacionais que mediram a eficiência na produção de etanol (GÓMEZ, 2016; SALAZAR-ORDÓÑEZ; PÉREZ-HERNÁNDEZ; MARTÍN-LOZANO, 2013; SESMERO; PERRIN; FULGINITI, 2012). No Brasil, existem vários estudos que versam sobre medidas de eficiência no setor sucroenergético (BRUNOZI JÚNIOR et al., 2012; DUARTE et al., 2019; LEMOS et al., 2019; PEREIRA; SILVEIRA, 2016; SALGADO JUNIOR; BONACIM; PACAGNELLA JUNIOR, 2009), porém as bases de dados e a abrangência deste estudos são diferentes da empregada na análise proposta neste trabalho.

Além desta breve introdução, este estudo está dividido em mais quatro seções, sendo: revisão de literatura e panorama da produção de etanol, metodologia e base de dados, resultados e discussão e, por fim, as conclusões.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA E PANORAMA DA PRODUÇÃO DE ETANOL**

Em 1931 para incentivar a produção do etanol, que ainda era considerado um subproduto da produção de açúcar, o Governo Federal promulgou a Lei nº 19.717 de 13 de março de 1931 a qual determinava a adição de 5% de etanol na gasolina importada, sendo que os automóveis que circulavam no Brasil deveriam utilizar álcool a uma proporção de pelo menos 10%. Desde então, as usinas de etanol e a produção de cana-de-açúcar expandiram para outras regiões do Brasil, gerando competição interna. De modo a evitar conflitos regionais, o governo estabeleceu cotas de produção para cada estado (TEIXEIRA et al., 2020).

A expansão do setor e sua importância econômica fez com que em 1975 fosse estabelecido o Programa Nacional para o Alcool (PROÁLCOOL). O Brasil conseguiu fomentar a produção de etanol através de incentivos e intervenções estatais ativas, o que diminuiu a importação de petróleo (GOLDEMBERG, 2008). Durante a segunda crise do

petróleo, em 1977, o etanol tornou-se ponto focal para a economia brasileira fazendo com que a indústria automotiva obtivesse estímulos do governo brasileiro e que houvesse fomento à produção de etanol (LEITE et al., 2009; MATSUOKA; FERRO; ARRUDA, 2009).

A ratificação do protocolo de Quioto em 1998, que propunha a redução da emissão de GEE através de uso de tecnologias mais limpas, também estimulou o incremento de etanol na produção brasileira. Nesse período o Brasil pôde promover sua produção de etanol no mercado internacional de combustíveis (FARGIONE et al., 2008; LUQUE et al., 2008).

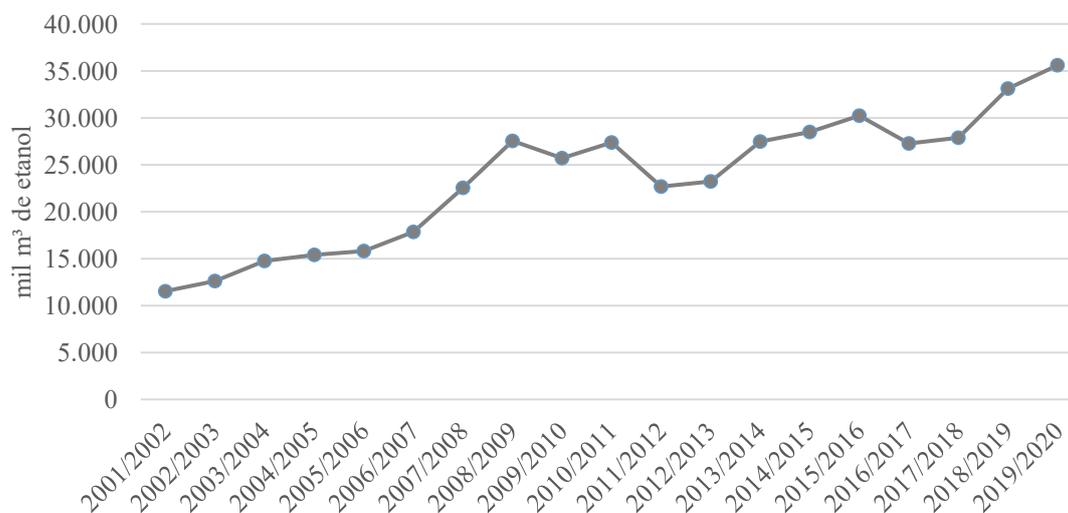
A desregulamentação no setor a partir dos anos 1990 tornou possível que as usinas diversificassem sua produção e escolhessem, em um ambiente competitivo, seus *mixes* de produção entre as produções de cana-de-açúcar, etanol, cachaça ou açúcar. Devido a essa nova parcela de mercado houve uma descentralização da produção do Nordeste e Sudeste para o resto do país (RODRIGUES; ROSS, 2020). Apesar disso, em locais onde existia capacidade de investimentos em tecnologia e recursos disponíveis ocorreu a formação de novos centros de produção. Em decorrência disso, a expansão da produção se concentrou em grandes áreas rurais, devido ao fácil acesso ao crédito rural, o que foi chamado de “modernização dolorosa” (ANDRADE, 1994 *apud* RODRIGUES; ROSS, 2020). Após a crise financeira de 2008 o governo brasileiro iniciou um controle de preços da gasolina, o que tornou o mercado de etanol menos competitivo. A falta de investimento e financiamento no setor, conjuntamente com a política governamental brasileira, causou o fechamento de 48 usinas entre 2007/2008 e 2013/2014 (RODRIGUES; ROSS, 2020). Segundo Teixeira et al. (2020) o PROÁLCOOL foi determinante para a expansão do etanol no Brasil, assim como o Renovabio, instituído pela Lei nº 13.576 de 26 de dezembro 2017, que também promoveu o setor de biocombustíveis, incluindo o etanol, denotando a importância de investimentos e financiamentos nesse setor.

A partir de 2010, o setor sucroenergético tem se internacionalizado através da aquisição de unidades processadoras de cana-de-açúcar por empresas do exterior, o que caracteriza uma desnacionalização do setor (RODRIGUES; ROSS, 2020). Além disso, empresas como Odebrecht e Petrobrás estão migrando para o setor de etanol em busca de diversificação na sua produção e, também, para buscar melhores imagens corporativas.

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, atrás dos Estados Unidos (EIA, 2020; EPE, 2018; RFA, 2019; USDA, 2018). Estes dois países representam cerca de 85% da produção mundial do produto (EIA, 2020). Ao contrário do que ocorre no Brasil, onde a produção de etanol usa cana-de-açúcar como principal matéria-prima, a produção

de etanol dos EUA ocorre, majoritariamente, por meio do uso de milho. A Figura 1 mostra a série histórica da produção de etanol brasileira da safra 2001/2002 até a safra 2019/2020.

Figura 1. Evolução da produção de etanol no Brasil (2001 – 2019)



Fonte: União dos produtores de Cana-de-açúcar (UNICA, 2021).

O etanol é considerado um substituto tecnicamente e economicamente viável aos combustíveis fósseis (LYND; CRUZ, 2010). O etanol pode ser produzido a partir de materiais celulósicos como gramas e madeiras, de materiais ricos em açúcar, como a cana-de-açúcar, a beterraba e o sorgo e de recursos a base de amido, como o milho ou o sorgo em grãos (GIRASE, 2010).

O incentivo ao crescimento do uso do etanol de cana-de-açúcar também esteve atrelado aos compromissos relacionados aos acordos internacionais de combate às mudanças climáticas. Neste sentido, o Brasil possui compromisso e metas estabelecidas na Política Nacional sobre Mudança do Clima instituída em 2009 pela Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009 e por isso precisa monitorar as emissões e os processos de produção, assim como o investimento em pesquisa e desenvolvimento e o fomento ao uso de biocombustíveis e cogeração de eletricidade (Decreto nº 6.263 de 21 de novembro de 2007).

Em 2019, o Brasil obteve um crescimento de aproximadamente 11% na produção de etanol, incluindo um crescimento de 17% no consumo doméstico (ANP, 2020b). De acordo com dados do EPE (2018), em 2017, os produtos derivados da cana-de-açúcar contribuíram com 16% da produção de energia brasileira. A Tabela 1 mostra a produção de etanol entre os anos de 2009 e 2019 em cada região brasileira.

Tabela 1. Produção de etanol em 1000 m<sup>3</sup> em cada região brasileira nas safras de 2009/2010 e 2019/2020

Safras	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro-Oeste	Sul
2009/2010	50,92	1.951,81	17.515,05	4.283,65	1.887,05
2010/2011	42,35	1.932,77	18.159,40	5.600,34	1.625,14
2011/2012	60,55	1.967,46	13.981,49	5.152,19	1.408,62
2012/2013	49,77	1.657,62	14.039,27	6.021,60	1.301,01
2013/2014	58,83	1.645,86	16.868,67	7.214,20	1.492,15
2014/2015	56,46	2.016,29	16.706,73	7.886,93	1.637,98
2015/2016	64,15	1.730,95	17.855,28	8.791,70	1.577,53
2016/2017	51,87	1.389,07	15.979,93	8.313,58	1.357,81
2017/2018	60,85	1.538,56	16.069,18	8.748,85	1.271,43
2018/2019	53,10	1.952,19	19.363,83	9.972,58	1.616,92
2019/2020	71,74	2.098,44	20.287,79	11.309,96	1.660,60

Fonte: UNICA (2021).

Conforme pode-se observar na Tabela 1, as regiões Sudeste e Centro-Oeste são as que mais tem contribuído para a produção brasileira de etanol na última década. A região Sudeste é responsável por cerca de 58% da produção total de etanol brasileira. O crescimento da produção ao longo do tempo, por outro lado, tem sido moderado, com taxa geométrica de crescimento de 0,94%. A região Centro-Oeste, em contrapartida, tem menor participação na produção total de etanol em relação à região Sudeste, mas tem apresentado crescimento da produção elevado ao longo do tempo, com crescimento geométrico de 5,37%. O avanço da produção na região Centro-Oeste é reflexo da expansão da indústria sucroalcooleira principalmente a partir do ano 2012. Com relação às demais regiões, pode-se verificar que a região Norte tem baixíssima participação na produção de etanol, enquanto a região Sul apresenta queda na produção e tem a produção concentrada no Paraná. A produção da região Nordeste, por sua vez, está estagnada. Esse breve panorama reforça a importância das regiões Sudeste e Centro-Oeste na produção sucroalcooleira brasileira.

Uma série de autores avaliaram a eficiência no setor de biocombustíveis e a eficiência energética, dentre os quais destacam-se Mardani et al. (2017), Gómez (2016), Salazar-Ordóñez et al. (2013), Pereira e Silveira (2016), Brunozi Júnior et al. (2012), Salgado Júnior et al. (2009) e Xavier (2014).

Mardani et al. (2017) realizaram uma revisão de 144 modelos do tipo DEA publicados entre 2006 e 2015 sobre eficiência energética. Os autores apontaram como ponto positivo destes estudos a capacidade dos modelos DEA de lidar com a escassez de dados, além

da habilidade desses modelos de se adaptarem a diferentes contextos de análise. Tais contextos se referem a problemas como a eficiência energética, a eficiência no uso da água, a eficiência ambiental *etc.* Apesar da grande quantidade de estudos revisados pelos autores, somente dois avaliaram produtos do setor sucroenergético.

Gómez (2016) avaliou as mudanças na eficiência técnica no setor de biocombustíveis em nove países da América Latina por meio de um modelo DEA-CCR com orientação ao produto. Os insumos escolhidos foram a produção anual de cana-de-açúcar e soja empregadas na produção de biocombustíveis e os produtos selecionados foram produção final de biodiesel e bioetanol, em cada país, no ano de 2010. Dentre os países analisados, Brasil e Peru apresentaram os maiores índices de eficiência técnica.

Salazar-Ordóñez et al. (2013) realizaram o cálculo de um modelo DEA-BCC orientado ao produto para avaliar a produção de bioetanol de beterraba na Espanha. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram incluídas como subprodutos indesejáveis no cálculo do modelo. Os insumos utilizados pelos autores para medir a eficiência técnica no âmbito da produção de bioetanol de beterraba foram: sementes, pesticidas e fertilizantes. Apenas um dos produtores analisados no estudo obteve a eficiência máxima de 1. Das DMUs analisadas, 70% obtiveram eficiência técnica abaixo de 0,7. Os pesticidas mostraram ter potencial de 64,9% de redução de uso nos insumos e, por isso, a produção de beterraba possui ainda um grande potencial para reduzir seus impactos ambientais.

Os autores Pereira e Silveira (2016) avaliaram a eficiência técnica (TE) das usinas de cana-de-açúcar no Brasil, focando sua análise na capacidade de inovação de 17 usinas localizadas na região Centro-Sul durante os anos de 2001 a 2008. Para tanto, os autores utilizaram um modelo DEA-BCC orientado aos insumos, a partir do qual calcularam um índice de Malmquist por meio de dados em painel. Como insumos foram utilizados a quantidade de cana-de-açúcar processada e o número de empregados na usina e, como produtos, foram utilizados etanol e açúcar. Ao longo das safras analisadas percebeu-se decréscimo no índice de eficiência, que foi explicado pelo fato da análise ocorrer em um período de recuperação econômica e de crise. De acordo com os autores, os valores de eficiência técnica calculados refletiram uma modernização nos processos de produção, uma vez que as firmas estavam mais próximas da fronteira de produção. Observou-se, também, que as usinas não apresentavam inovação no processo de produção, sendo denominadas, na sua maioria, de firmas seguidoras, ou seja, firmas que replicavam as ações de outras usinas. Por fim, foi observado que ao longo do tempo houve uma grande

variação no índice de eficiência, indicando, portanto, oscilações no desempenho ao longo do tempo.

Brunozi Júnior et al. (2012) mediram a eficiência nas usinas de etanol de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo por meio de DEA. Os autores analisaram 17 DMUs utilizando como insumos os estoques, imobilizados e salários e, como produto, o faturamento bruto. Da amostra de 17 usinas analisadas, 4 DMUs foram consideradas eficientes e 13 foram consideradas tecnicamente ineficientes. Das 13 usinas ineficientes, 4 apresentaram problemas de escala. Além disso, Brunozi Júnior et al. (2012) afirmam que o faturamento das usinas eficientes foi, em média, 86% superior ao das demais usinas da amostra.

Salgado Junior et al. (2009) avaliaram a relação entre escala e eficiência técnica de uma amostra de 26 usinas localizadas na região Nordeste de São Paulo. Os resultados apontaram que 11 usinas podiam ser consideradas eficientes e que a escala de produção das usinas não foi um fator determinante para a eficiência, já que algumas das menores encontravam-se no grupo eficiente.

Xavier (2014) mediu a eficiência das usinas do setor sucroenergético brasileiro na safra 2012/2013. Para tanto, o autor utilizou um modelo DEA orientado aos insumos, calculado por meio de dados primários coletados de 67 usinas de açúcar e etanol. Os resultados apontaram que as eficiências técnicas alocativas e puras não mostraram diferença significativa, no entanto a eficiência alocativa mostrou ter maior heterogeneidade entre as usinas da amostra. O autor concluiu que as usinas possuíam potencial de ganhos de eficiência econômica de 90%, além disso mostrou que seria possível melhorar o desempenho por meio de uma maior adesão ao arrendamento de terras para a produção de cana-de-açúcar.

### **3 METODOLOGIA E BASE DE DADOS**

#### **3.1 O modelo DEA-CCR**

Farrell (1957) pode ser considerado o trabalho seminal sobre análise de eficiência técnica. O autor comparou a eficiência de diferentes DMUs com diferentes produtos derivados de insumos comuns. A sua proposta metodológica consiste em uma das primeiras formalizações de análises do tipo DEA. Charnes et al. (1978) formalizaram o

modelo DEA com retornos constantes de escala (CRS), conhecido na literatura como DEA-CRS ou DEA-CCR<sup>1</sup>, utilizando programação linear (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011). Banker et al. (1984) aprimoraram a análise avaliando as economias de escala, criando o modelo DEA com retornos variáveis de escala (VRS), conhecido na literatura como DEA-VRS ou DEA-BCC<sup>2</sup>. De acordo com Vasconcellos et al. (2006), as abordagens mais comuns na literatura utilizam os modelos DEA-BCC e DEA-CCR. Além destas abordagens mais tradicionais, existem outras para estimar a eficiência através de modelos do tipo DEA. O'Donnell (2018) apresenta abordagens alternativas que contam com pressuposições adicionais a respeito da função de produção, tais como não considerar a existência de mudança técnica, retornos não-crescentes de escala e retornos não-decrescentes de escala.

Devido à natureza determinística dos modelos do tipo DEA é possível que ocorram erros de mensuração. Desta forma, é necessário se atentar à presença de *outliers*, bem como à qualidade dos dados, já que os modelos do tipo DEA são medidas de eficiências relativas e não absolutas de cada DMU (BATTESE; COELLI, 1995; PEREIRA; TAVARES, 2017).

Battese e Coelli (1992) explicam que as funções de fronteira de produção são amplamente utilizadas para medir a eficiência na produção de produtos do setor agropecuário. Neste contexto, obtém-se a eficiência técnica (TE) por meio do cálculo da razão dos valores observados até chegar-se ao valor da fronteira estimada, obtendo-se resultados relativos.

Uma usina de etanol, para ser considerada eficiente, precisa maximizar o produto gerado ou minimizar os insumos empregados na produção. De acordo com a teoria da produção clássica, uma firma utiliza uma variedade de insumos para produzir um determinado produto, o que ocorre por meio de uma função de produção. De acordo com Coelli et al. (1998), uma função de produção precisa ter algumas propriedades como não negatividade, essencialidade fraca, não ser decrescente nos insumos e ser côncava nos insumos.

Dentre os vários métodos empregados para se calcular a eficiência existem dois mais comuns na literatura: Análise de Fronteira Estocástica (SFA) e a Análise Envoltória de Dados (DEA). Os modelos do tipo SFA medem a ineficiência de uma determinada unidade

---

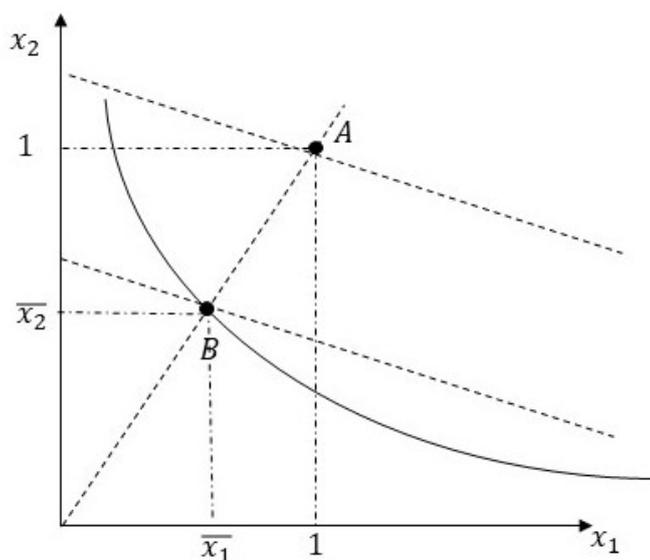
1 CCR é a abreviatura do nome dos autores Charnes, Cooper e Rhodes.

2 BCC é a abreviatura do nome dos autores Banker, Charnes e Cooper.

tomadora de decisão (DMU) através de uma regressão que inclui um erro e outras pressuposições estatísticas, devido ao uso de estimadores estatísticos (ASSEFA ADMASSIE; MATAMBALYA, 2002; O'DONNELL, 2018), enquanto os modelos do tipo DEA são considerados não paramétricos, pois não pressupõem uma forma funcional pré-determinada para a função de produção nem para o erro da regressão (O'DONNELL, 2018).

A Figura 2 mostra uma fronteira de produção onde uma determinada firma se decide entre dois produtos. O ponto A representa ineficiência e o ponto B é onde a empresa operaria de forma mais eficiente, minimizando o uso de insumos.

Figura 2. Comportamento de gestão das empresas para minimizar recursos



Fonte: Adaptado de O'Donnell (2018).

Com relação a eficiência técnica de cada DMU, sendo a DEA uma análise de fronteira por partes, então as DMUs posicionadas próximas à fronteira (ponto B) no conjunto convexo terão os maiores valores de eficiência, normalmente ranqueados entre 0 e 1 (KUMAR; ARORA, 2012; O'DONNELL, 2018).

A solução de modelos do tipo DEA é feita por meio de programação linear, mantendo-se as pressuposições com relação as tecnologias de produção, com relação a concavidade e com relação a monotonicidade e requer que as DMUs sejam homogêneas (DUARTE et al., 2019; GÓMEZ, 2016; SALAZAR-ORDÓÑEZ; PÉREZ-HERNÁNDEZ; MARTÍN-LOZANO, 2013).

O modelo DEA-CRS ou DEA-CCR é representado pelas expressões (1) e (2), na sua formulação de minimização (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978).

$$Eff = \min \sum \frac{v_i x_{i0}}{\mu_r y_{r0}} \quad (1)$$

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

s. a.

$$\frac{\sum v_i x_{ij}}{\sum \mu_r y_{rj}} \geq 1; \forall j \quad (2)$$

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  $\mu_r$  e  $v_i$  são os pesos atribuídos a cada variável e que serão resultantes da solução do problema (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; COOPER; SEIFORD; ZHU, 2011).

A expressão (3) apresenta as variáveis que compõem a função de produção utilizada para obter-se as eficiências das usinas produtoras de etanol.

$$q_1 = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

Em que:  $q_1$  é a receita líquida de cada DMU no ano de 2018,  $x_1$  é o número de empregados de cada DMU no ano de 2018 e  $x_2$  é a capacidade de cana de açúcar processada em cada DMU no ano de 2018 (ANP, 2020).

Os movimentos de cada DMU para chegar até a fronteira podem ser analisados a partir da abordagem de *benchmarking*, que propõe metas a serem atingidas para melhorar a performance das DMUs em relação a uma amostra homogênea de DMUs (LIM; BAE; LEE, 2011). A análise de *benchmarking* tem como finalidade a melhoria organizacional, e, dessa forma, esta abordagem identifica as melhores práticas operacionais de DMUs para alcançar melhorias, avaliando DMUs que transformam o mesmo tipo de recursos (ou insumos) em produtos, ou seja, DMUs homogêneas (BOGETOFT; OTTO, 2013). As DMUs mais eficientes são separadas em um conjunto chamado DEA *benchmarking*, na qual é possível inferir sobre o aperfeiçoamento na competição interna das DMUs fora desse conjunto (VASCONCELLOS; CANEN; LINS, 2006). Dessa forma, o cálculo da DEA trará informações referentes às DMUs da análise que pertencem a um mesmo cenário, tornando possível a análise de *benchmarking*.

### 3.1 Base de dados

O Quadro 1 apresenta um resumo com as variáveis utilizadas para mensurar as eficiências no âmbito da produção de etanol com base nos dados da pesquisa.

Quadro 1. Variáveis utilizadas na análise de eficiência das usinas

Variável	Classificação	Descrição
Receita líquida	Produto	Receita líquida em reais no ano de 2018 de cada DMU (EXAME, 2019).
Número de empregados	Insumo	Número de empregados em 2018 de cada usina da amostra (EXAME, 2019).
Armazenamento	Insumo	Capacidade de armazenamento de cana-de-açúcar de cada usina da amostra (ANP, 2020a).

Fonte: Dados da pesquisa.

De modo a ajustar o erro proveniente da omissão da compra por terceiros no modelo, foi somado um fator de correção para a variável armazenamento de cana-de-açúcar. O fator de correção considera a produção de cana-de-açúcar no município em que a DMU está localizada como uma *proxy* para a variável compra de cana-de-açúcar por terceiros. Este procedimento, ajuda a corrigir erros provenientes do cálculo da eficiência de DMUs que tenham baixa capacidade de armazenamento, mas que não processam cana-de-açúcar abaixo da sua capacidade instalada devido, justamente, ao fato de comprarem matéria prima de terceiros.

O Quadro 2 apresenta a escala de valores utilizada para classificar as eficiências estimadas. Esta escala de valores é baseada nos trabalhos de Sueyoshi e Kirihara (1998) e Balbino et al. (2020).

Quadro 2. Classificação das 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 Kirihara (1998) e Balbino et al. (2020).

Após o cálculo das eficiências é possível mensurar o quanto cada DMU precisa melhorar no uso de insumos para alcançar a fronteira de melhor prática ou *benchmarking* (BOGETOFT; OTTO, 2013). A partir dos valores alvo para os insumos de cada DMU será feita a diferença com relação ao valor observado, encontrando assim o quanto seria necessário modificar no uso de insumos para que as DMUs ineficientes se tornassem eficientes.

Na análise DEA também foi utilizado um fator de correção para a variável armazenamento de cana-de-açúcar. O intuito desse fator de correção é minimizar os erros com relação à compra de cana-de-açúcar por terceiros, já que não foram encontradas informações acerca desta variável nas bases de dados disponíveis para o estudo. Dessa forma, o fator de correção considera a produção de cana-de-açúcar no município em que a DMU está localizada como uma *proxy* para a variável compra de cana-de-açúcar por

terceiros. Este procedimento, ajuda a corrigir erros provenientes do cálculo da eficiência de DMUs que tenham baixa capacidade de armazenamento, mas que não processam cana-de-açúcar abaixo da sua capacidade instalada devido, justamente, ao fato de comprarem matéria prima de terceiros. A expressão (4) mostra o procedimento de correção adotado neste estudo.

$$\text{Armazenamento} = \text{Armazenamento de cana} + \frac{\text{valor da receita no município}}{\text{produção no município}} \quad (4)$$

Assim, espera-se que a incorporação da expressão (4) ajuste o erro proveniente da omissão da compra por terceiros no modelo ao adicionar um incremento relativo à quantidade produzida de cana no município onde a usina está localizada.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As empresas avaliadas neste artigo foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de dados para o cálculo do modelo DEA-CRS orientado aos insumos e para realizar a análise de *benchmarking*, que se baseia na análise comparativa das usinas eficientes encontradas no modelo. O termo se refere à fronteira de melhores práticas, onde diferentes DMUs ineficientes utilizam estratégia similar às DMUs eficientes, melhorando suas eficiências (BOGETOFT; OTTO, 2013). O Quadro 3 apresenta as informações acerca das empresas que formam o conjunto de dados das usinas de produção de etanol utilizado neste estudo.

Quadro 3. Usinas de cana-de-açúcar que produzem etanol (DMUs) que compõem a base de dados do modelo de eficiência de etanol de cana-de-açúcar – Brasil, 2018

DMU	Estado	Município	Mesorregião
Alta Mogiana	São Paulo	São Joaquim da Barra	Ribeirão Preto
Alto Alegre	São Paulo	Presidente Prudente	Presidente Prudente
Quatá	São Paulo	Lençóis Paulista	Assis
São Martinho	São Paulo	Pradópolis	Ribeirão Preto
Tereos Açúcar e Energia	São Paulo	Olímpia	São José do Rio Preto
Tereos São José	São Paulo	Colina	Ribeirão Preto
Usina batatais	São Paulo	Batatais	Ribeirão Preto
Usina Branco Peres	São Paulo	São Paulo	Presidente Prudente
Usina da Pedra	São Paulo	Serrana	Ribeirão Preto
Usina Nardini	São Paulo	Vista Alegre do Alto	Ribeirão Preto
Usina Santa Fé	São Paulo	Nova Europa	Araraquara
Usina Santa Isabel	São Paulo	Novo Horizonte	São José do Rio Preto

Usina São José da Estiva	São Paulo	Novo Horizonte	São José do Rio Preto
Usina São Manoel	São Paulo	São Manuel	Bauru
CMNP	Paraná	Jussara	Noroeste Paranaense
Usaçúcar	Paraná	Terra Rica	Noroeste Paranaense
Bioenergética Aroeira	Minas Gerais	Tupaciguara	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba
Bioenergética Vale do Paracatu	Minas Gerais	João Pinheiro	Noroeste de Minas
Delta sucroenergia	Minas Gerais	Delta	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba
USA	Minas Gerais	Pirajuba	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba
Usina Cerradão	Minas Gerais	Frutal	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba
Usina Vale do Tijuco	Minas Gerais	Uberaba	Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba
Barralcool	Mato Grosso	Barra do Bugres	Sudoeste Mato-Grossense
Cerradinho Bionergia	Goiás	Chapadão do Céu	Sul Goiano
Usina Panorama	Goiás	Itumbiara	Sul Goiano
Usina Vale do Verdão	Goiás	Turvelândia	Sul Goiano

Fonte: Dados da pesquisa.

As empresas que compõem a amostra estão localizadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás e Paraná. Os estados que compõem a amostra, somados ao Mato Grosso do Sul, fazem parte do que tem sido denominado na literatura sobre o assunto de expansão da região Centro-Sul (PEREIRA; TAVARES, 2017). Conforme pode-se observar no Quadro 3, a maior parte das DMUs que compõem a base de dados estão localizadas nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Em 2018, esses dois estados foram responsáveis por cerca de 60% da produção de etanol de cana-de-açúcar, o que demonstra a importância da produção nestas localidades.

A mesorregião de Ribeirão Preto, em São Paulo, possui a maior quantidade de usinas dentre todas as mesorregiões do IBGE que compõem a amostra, seguida pela mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba em Minas Gerais. Destaca-se, também, em termos de quantidade a mesorregião de São José do Rio Preto (SP). A Tabela 2 apresenta as eficiências calculadas, a classificação, bem como a localização das usinas de etanol que compõem a amostra.

Tabela 2. Eficiências, classificação das eficiências e retornos à escala das usinas de cana-de-açúcar na produção de etanol– Brasil, 2018

DMU	Estado	Eficiências	Classificação
Quatá	São Paulo	0,144	Baixa
Usina São Manoel	São Paulo	0,264	Baixa

Usina Vale do Verdão	Goiás	0,305	Baixa
CMNP	Paraná	0,334	Baixa
Usina Santa Fé	São Paulo	0,340	Baixa
Alta Mogiana	São Paulo	0,349	Baixa
Bioenergética Aroeira	Minas Gerais	0,375	Baixa
Bioenergética Vale do Paracatu	Minas Gerais	0,381	Baixa
Usina Nardini	São Paulo	0,475	Baixa
Barralcool	Mato Grosso	0,492	Baixa
Cerradinho Bionergia	Goiás	0,504	Regular
USA	Minas Gerais	0,507	Regular
Usina Branco Peres	São Paulo	0,527	Regular
São Martinho	São Paulo	0,537	Regular
Tereos São José	São Paulo	0,542	Regular
Usina Cerradão	Minas Gerais	0,586	Regular
Usina Vale do Tijuco	Minas Gerais	0,634	Regular
Usina São José da Estiva	São Paulo	0,643	Regular
Usina Batatais	São Paulo	0,710	Regular
Usina da Pedra	São Paulo	0,724	Regular
Usina Panorama	Goiás	0,868	Alta
Alto Alegre	São Paulo	0,992	Alta
Delta Sucroenergia	Minas Gerais	1	Eficiente
Usaçúcar	Paraná	1	Eficiente
Usina Santa Isabel	São Paulo	1	Eficiente
Tereos Açúcar e Energia	São Paulo	1	Eficiente

Fonte: Dados da pesquisa.

A coluna “classificação” da Tabela 2 qualifica as DMUs de acordo com o nível de eficiência, sendo que uma baixa eficiência denota um índice de até 0,5, uma eficiência regular possui índice entre 0,5 e 0,8, uma eficiência alta possui números superiores a 0,8 e inferiores a 1 e usinas eficientes tem um índice igual a 1. Percebe-se, ainda por meio da Tabela 2, que cerca de 36% das usinas do estado de São Paulo permaneceram na faixa de eficiência baixa. Dessas DMUs 40% (ou 2 DMUs) pertencem à mesorregião de Ribeirão Preto e o restante a diferentes mesorregiões, não havendo usinas com eficiência baixa na mesorregião de São José do Rio Preto.

Nota-se que, assim como apontou Xavier (2014), as usinas apresentam alta variabilidade nas eficiências. Isso pode estar refletindo a heterogeneidade dos sistemas produtivos das usinas e das regiões do Brasil. Em todas as faixas de eficiência existem usinas pertencentes pelo menos a três diferentes estados. Além disso, é importante destacar a importância dos fatores socioeconômicos, geográficos e ambientais para a prosperidade do setor sucroalcooleiro. O sucesso de São Paulo foi dependente desses fatores durante boa parte da expansão sucroalcooleira no Brasil.

Na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, a distância das usinas com relação aos centros de produção de cana-de-açúcar é um dos fatores que garantem competitividade regional, além de condições edafoclimáticas propícias e proximidade com o estado de São Paulo. A infraestrutura existente no local também parece ter exercido papel importante. Em Uberaba, por exemplo, existe um terminal terrestre para o transporte de etanol, sendo esta considerada uma conquista na logística de produção. Além disso, existem várias rodovias federais e estaduais, que ligam, por exemplo, polos como Uberaba e Frutal onde estão localizadas as usinas Vale do Tijuco e Cerradão, respectivamente (SANTOS, 2017).

Diferentemente de Minas Gerais e São Paulo, os estados do Paraná e Goiás possuem estrutura de desenvolvimento do etanol similares. A longa distância até o porto de Santos propicia o desenvolvimento do comércio doméstico, fomentando a produção de etanol em cidades interioranas (SAMPAIO, 2019). A Usaçúcar, no estado do Paraná, foi inaugurada em 2007, no município de Terra Rica, e gerou mais de 3 mil empregos no campo e indústria, que é o reflexo de grandes modificações sociais e econômicas em pequenas cidades paranaenses (RIBEIRO; ENDLICH, 2009). Entre 2008 e 2011, a Usaçúcar passou a cerca de 28% de área mecanizada para mais de 60%, em 2016 ela já operava com 94,52% (VERRI et al., 2016). A produção própria de cana-de-açúcar conjuntamente com a tecnologia empregada podem ser fatores que propiciam eficiência a esta usina.

Silva e Périco (2022) avaliaram as usinas Alta Mogiana, Batatais, Usina da Pedra, São Manuel e São Martinho entre outras usinas do estado de São Paulo, avaliando questões de ordem econômicas, sociais e ambientais. Embora não haja possibilidade de comparação direta dos resultados dos autores com o deste estudo é possível observar que os valores médios de eficiência social média, que considera a maximização do salário dos empregados por hectare plantado, são muito similares ao deste estudo, destacando a Usina São Martinho, que apresentou diferença no valor de apenas 0,03 para cima. Já a eficiência econômica média que considera a maximização da produção de açúcar e etanol, os resultados médios apresentados por Silva e Périco (2022) variaram significativamente para cima, exceto para a Usina Batatais que obteve um valor de eficiência maior neste estudo. Especula-se que essa diferença nas eficiências calculadas poderia estar refletindo o fato de que o modelo de negócios da usina Batatais utiliza arrendamento de terras e a compra de cana-de-açúcar de terceiros (CARVALHO, 2014), mesmo após a minimização deste tipo de ruído, o que em contrapartida pode ter reduzido a eficiência média das outras usinas.

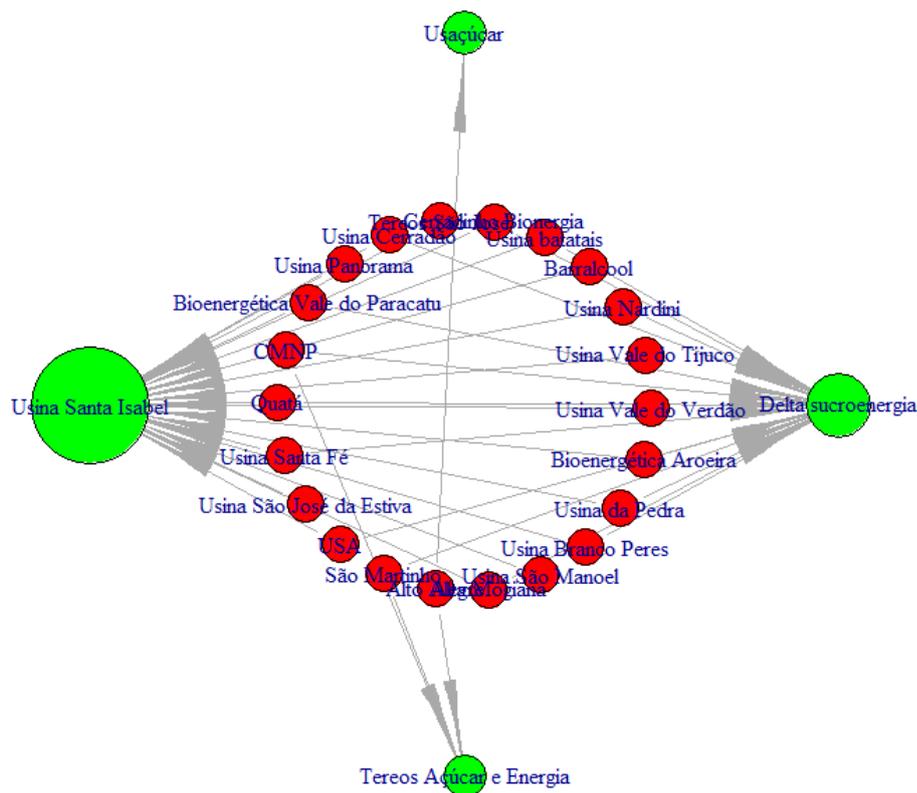
Além disso, o porte dessas usinas varia, e enquanto as de São Martinho, Alta Mogiana e Usina da Pedra são consideradas de grande porte, a São Manuel e a Batatais podem ser consideradas de porte médio (SILVA; PÉRICO, 2022).

As usinas consideradas eficientes de acordo com os resultados do modelo foram: Delta Sucoenergia, Usaçúcar, Usina Santa Isabel e Tereos Açúcar e Energia. Ainda em termos de eficiência, destacaram-se a mesorregião de São José do Rio Preto em São Paulo e a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba em Minas Gerais. As usinas menos eficientes foram a “Quatá” e a “Usina São Manoel” com eficiências inferiores a 0,3.

De acordo com o Plano Nacional de Bioenergia de 2006 a 2011, o estado de Goiás foi considerado uma das áreas potenciais para expandir a produção de cana-de-açúcar com o uso de modernas tecnologias e alta lucratividade (SOARES; GONÇALVES; SPECIAN, 2019). Mesquita e Castillo (2019) apontam que a competitividade do setor sucroalcooleiro Goiano é dependente de fatores internos como adaptação econômica, social e cultural. De acordo com os autores, isso é reflexo do próprio mercado de etanol que está intimamente relacionado com o cenário regional e nacional. Com relação às usinas localizadas neste estado, a Usina Panorama, que foi inaugurada em 2007 na cidade de Itumbiara a partir de um investimento de mais de dois bilhões de reais, apresentou eficiência alta no modelo calculado. A Usina Vale do Verdão, que teve como fonte de origem do investimento inicial o mesmo grupo econômico, apresentou eficiência baixa comparativamente às outras DMUs da amostra.

A Figura 2 apresenta as relações de *benchmarking* das DMUs analisadas, apresentando a distância que cada DMU está em relação às usinas eficientes, uma vez que as DMUs que não são eficientes têm maior probabilidade de fazer *benchmarking* com as usinas eficientes mais próximas.

Figura 2. *Benchmarking* das usinas eficientes e não eficientes



Fonte: Dados da pesquisa.

As usinas “Delta Sucrenergia” e “Santa Isabel” localizadas em Minas Gerais e São Paulo, respectivamente, predominam as relações de *benchmarking*, isto é, à luz do modelo, as características de produção destas usinas servem de referência para quase todas as outras usinas que não são eficientes, a fim de torná-las eficientes. Para esse tipo de estrutura essas usinas são denominadas principal *benchmark* ou parceiras de excelência pois podem beneficiar o maior número de DMUs ineficientes no modelo (OLIVEIRA et al., 2014).

Por outro lado, a Tereos Açúcar e Energia pode agregar melhores práticas para a São Martinho, a Alto Alegre e a CMNP, enquanto a Usaçúcar, que fica no Paraná, somente com a Alto Alegre. Isso pode ser um reflexo das peculiaridades do setor no estado do Paraná. A CMNP, que é também localizada no Paraná, é uma das poucas que tem como referência a Tereos Açúcar e Energia, embora também tenha relações próximas com a Usina Santa Isabel, localizada na mesorregião de São José do Rio Preto. Por ter apresentado eficiência baixa esta usina pode ter maior flexibilidade para mudar seu *mix* de insumos e aumentar a eficiência.

É também interessante notar que as Usinas do estado de Goiás e do Mato Grosso estão mais próximas da Delta Sucoenergia, ou seja, as características de produção são mais compatíveis do que a Usina Santa Isabel, mesmo obtendo relação de *benchmarking*.

A Tabela 3 apresenta as mudanças necessárias na quantidade de insumos empregados na produção de cada usina para que elas possam aumentar sua eficiência técnica sem modificar suas receitas de venda líquida.

Tabela 3. Mudanças necessárias das DMUs na quantidade de seus insumos quantidade de empregados e processamento de cana-de-açúcar para alcançar eficiência através de *benchmarking*

DMU	Empregados ( $x_1$ ) (n.º de indivíduos)	Cana-de-açúcar ( $x_2$ ) (toneladas)
Quatá	-1.577,63	-18.711,70
Usina São Manoel	-1.546,77	-4.091,42
Usina Vale do Verdão	-731,27	-3.495,09
CMNP	-2.073,41	-9.997,22
Usina Santa Fé	-1.621,06	-15.851,20
Alta Mogiana	-2.358,77	-27.167,40
Bioenergética Aroeira	-455,5	-6.801,17
Bioenergética Vale do Paracatu	-1.023,27	-9.400,94
Usina Nardini	-1.466,24	-10.611,50
Barralcool	-414,167	-11.312,50
Cerradinho Bionergia	-937,32	-12.009,20
USA	-790,53	-8.465,59
Usina Branco Peres	-356,739	-3.780,02
São Martinho	-5.821,18	-23.157,70
Tereos São José	-499,47	-8.906,71
Usina Cerradão	-536,43	-5.028,13
Usina Vale do Tijuco	-421,47	-10.401,60
Usina São José da Estiva	-254,84	-3.193.339
Usina Batatais	-1.107,48	-5.509,84
Usina da Pedra	-1.206,78	-6.571,46
Usina Panorama	-37,67	-1.896.233
Alto Alegre	-81,97	-77,21
Delta sucoenergia	0	0
Tereos Açúcar e Energia	0	0
Usaçúcar	0	0
Usina Santa Isabel	0	0

Fonte: Dados da pesquisa.

Com relação às receitas de venda, como o modelo DEA-CRS está orientado aos insumos, então todos os valores de receita das DMUs foram mantidos constantes, enquanto o uso de insumos foi alterado para avaliar possíveis mudanças nas eficiências. Neste tipo

de análise usinas eficientes não necessitam mudar suas proporções de insumos utilizados na produção. Isso deve ser feito somente por aquelas DMUs que não atingiram a eficiência.

A Usina Alto Alegre, na mesorregião de Presidente Prudente, é a que possui os menores valores de mudança em número de empregados e cana-de-açúcar para alcançar a eficiência, isso representa cerca de 0,8% da sua quantidade total de empregados e quantidade de cana utilizada, a menor proporção dentre todas as usinas que não estão na fronteira. Já a Usina Panorama, apesar de ter a menor redução no número de empregados dentre todas as DMUs analisadas, apresenta uma proporção de redução de número de empregados de aproximadamente 13%. Além disso, o valor de redução no processamento de cana-de-açúcar necessário para que ela se torne eficiente é o quarto maior, representando 98% de redução da cana utilizada na usina, proporção similar às Usinas São José da Estiva, Usina Vale do Verdão e Usina São Manoel, sendo que a média de redução foi de 62%. Essa alta redução no uso da cana-de-açúcar pode ser reflexo da *proxy* utilizada para compra de cana por terceiros que não considera diretamente o preço da cana-de-açúcar.

A São Martinho apresentou o maior valor bruto de redução no número de empregados para operar na faixa eficiente. Este resultado não é surpreendente, pois esta unidade, de acordo com um relatório da ONG Repórter Brasil (2011), foi autuada devido a irregularidades trabalhistas relacionadas a más condições de trabalho e não disponibilização de EPIs aos seus empregados. Embora tenha apresentado o maior valor bruto, a proporção da redução em quantidade de empregados é de 46,3%, sendo esse valor próximo da redução média das usinas não eficientes que foi de 51%.

A Quatá, que possui menor eficiência, precisaria alterar menos seus insumos do que a Usina São Martinho, que precisaria diminuir o uso de insumos de maneira mais intensa para melhorar sua eficiência. Este fato pode estar relacionado à localização geográfica da Usina São Martinho, uma vez que aspectos geoeconômicos tem se mostrado de grande relevância para determinar as eficiências. A Usina São Martinho pertence à mesorregião de Ribeirão Preto, enquanto a Usina Quatá está localizada em Assis. A Usina São Manoel, por sua vez, precisa alterar a quantidade de cana-de-açúcar empregada em uma proporção maior que as demais usinas analisadas.

Analisando essa relação proporcionalmente, a Usina São Martinho precisa reduzir cerca de 46% sua quantidade de empregados, enquanto a Usina Quatá e a Usina São Manoel precisam reduzir em 80% e 73% a quantidade de empregados para alcançar a fronteira.

A alta variação na necessidade de mudança no uso de insumos para se tornar eficiente reflete um ambiente produtivo heterogêneo, na qual outros fatores não incorporados ao modelo de cálculo das eficiências proposto, como localização das unidades produtivas, infraestrutura, mão-de-obra, preço ou clima, podem influenciar significativamente o desempenho de uma determinada DMU produtora de etanol.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo calcular a eficiência técnica através de um modelo DEA-CRS com orientação aos insumos a partir dos dados de produção e uso de insumos de 26 usinas de etanol de cana-de-açúcar localizadas nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste do Brasil para o ano de 2018.

Os resultados apontaram que as usinas eficientes da amostra estão localizadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, destacando-se a mesorregião de São José do Rio Preto e a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, em São Paulo e Minas Gerais, respectivamente. Notou-se também que as usinas do Paraná parecem estar em um ambiente produtivo diferente quando leva-se em consideração a análise de *benchmarking*. Além disso, todas as usinas não eficientes apresentaram uma alta necessidade de redução no uso de insumos, com exceção da Alto Alegre.

Uma limitação do presente estudo está relacionada a possível omissão de variáveis que afetam as eficiências. Assim, para futuros estudos, sugere-se que outras variáveis e informações relacionadas às DMUs produtoras de etanol sejam utilizadas na estimação do modelo DEA, ou em uma análise de segundo estágio, para que se possa avaliar de forma mais detalhada os fatores determinantes destas eficiências. Além disso, a ausência de dados com relação às DMUs é um grande limitador para estudos desta natureza, principalmente no que diz respeito a séries históricas e a representatividade do setor. Desta forma, acredita-se que com o levantamento de informações primárias com respeito às usinas, poder-se-ia obter resultados mais específicos e precisos.

Por fim, sugere-se, ainda como possibilidade para trabalhos futuros, comparar os resultados obtidos para as eficiências da produção de etanol por meio de DEA com outros métodos como o de fronteira estocástica.

## REFERÊNCIAS

- ANP. **Painel dinâmico de produtores de etanol**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/etanol/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol>>. Acesso em: 24 set. 2020a.
- ANP. **Comercialização de combustíveis em 2019 apresenta aumento em relação a 2018 safras**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/5626-comercializacao-de-combustiveis-em-2019-apresenta-aumento-em-relacao-a-2018>>. Acesso em: 24 set. 2020b.
- ASSEFA ADMASSIE; MATAMBALYA, F. A. S. T. Technical Efficiency of Small-and Medium-Scale Enterprises: Evidence from a Survey of Enterprises in Tanzania. **Eastern Africa Social Science Research Review**, v. 18, n. 2, p. 1–29, 2002.
- BALBINO, V. A.; SOUZA, C. C.; FRAINER, D. M. Análise da eficiência das indústrias de açúcar e álcool com a análise envoltória de dados. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 351–361, 2020.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, set. 1984.
- BATTESE, G. E.; COELLI, T. J. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: With application to paddy farmers in India. **Journal of Productivity Analysis**, v. 3, n. 1–2, p. 153–169, 1992.
- BATTESE, G. E.; COELLI, T. J. A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data. **Empirical Economics**, v. 20, p. 325–332, 1995.
- BOGETOFT, P.; OTTO, L. **Benchmarking with DEA, SFA, and R**. 1º ed. Nova Iorque: [s.n.].
- BRASIL, R. **O etanol brasileiro no mundo: Os impactos socioambientais causados por usinas exportadoras**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://reporterbrasil.org.br/>>.
- BRUNOZI JÚNIOR, A. C. et al. Eficiência produtiva e análise econômica e financeira de usinas de cana de açúcar do estado de São Paulo. **Revista Ambiente Contábil**, v. 4, n. 2, p. 74–92, 2012.
- CANA-DE-AÇÚCAR, U. DA I. DE. **Histórico da Produção e Moagem**. Disponível em: <[https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=2492&produto=etanol\\_total&safralni=2001%2F2002&safralFim=2019%2F2020&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR](https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=2492&produto=etanol_total&safralni=2001%2F2002&safralFim=2019%2F2020&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR)>. Acesso em: 3 jul. 2021.
- CARVALHO, T. F. O. **Modernização agrícola e a região da Alta Mogiana paulista:**



- KUMAR, S.; ARORA, N. Evaluation of Technical Efficiency in Indian Sugar Industry: An Application of Full Cumulative Data Envelopment Analysis. **Eurasian Journal of Business and Economics**, v. 5, n. 9, p. 57–78, 2012.
- LEITE, R. C. C. et al. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v. 34, n. 5, p. 655–661, 2009.
- LEMOS, S. V. et al. Agroindustrial best practices that contribute to technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol production mills. **Energy**, v. 177, p. 397–411, 2019.
- LIM, S.; BAE, H.; LEE, L. H. A study on the selection of benchmarking paths in DEA. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 6, p. 7665–7673, jun. 2011.
- LUQUE, R. et al. Biofuels: A technological perspective. **Energy and Environmental Science**, v. 1, n. 5, p. 542–564, 2008.
- LYND, L. R.; CRUZ, C. H. DE B. Make Way for Ethanol. **Science**, v. 330, p. 1176–1177, 2010.
- MARDANI, A. et al. A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. May, p. 1298–1322, 2017.
- MATSUOKA, S.; FERRO, J.; ARRUDA, P. The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. **In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant**, v. 45, n. 3, p. 372–381, 2009.
- MESQUITA, F. C.; CASTILLO, R. A. Técnica e política na agricultura globalizada: expansão do setor sucroenergético em Goiás. **GeoUsp**, v. 23, n. 2, p. 285–306, 2019.
- MILANEZ, A. Y. et al. O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. **Biocombustíveis**, p. 277–302, 2015.
- O'DONNELL, C. J. **Productivity and Efficiency Analysis**. [s.l.] Springer Singapore, 2018.
- OLIVEIRA, S. M. DE; RIBEIRO, C. DE O.; CICOGNA, M. P. V. Uncertainty effects on production mix and on hedging decisions: The case of Brazilian ethanol and sugar. **Energy Economics**, v. 70, p. 516–524, fev. 2018.
- OLIVEIRA, T. B. A. et al. Analyzing the costs and efficiency in the sugarcane farms using data envelopment analysis. **Custos e Agronegócio**, v. 10, n. 1, p. 228–252, 2014.
- PEREIRA, C.; SILVEIRA, J. M. F. J. Análise Exploratória da Eficiência Produtiva das Usinas de Cana-de-açúcar na. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 1, p. 147–166, 2016.
- PEREIRA, N. A.; TAVARES, M. Efficiency of major producing regions of sugar cane through Data Envelopment Analysis (DEA). **Custos e Agronegócio**, v. 13, n. Special

Edition, p. 37–70, 2017.

RFA. **Annual fuel production**. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 2 abr. 2020.

RIBEIRO, V. H.; ENDLICH, Â. F. O avanço da agroindústria canavieira na mesorregião Noroeste do Paraná. **Perspectiva geográfica**, v. 5, n. 1, p. 21–37, 2009.

RODRIGUES, G. S. DE S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia: EDUFU, 2020.

SALAZAR-ORDÓÑEZ, M.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, P. P.; MARTÍN-LOZANO, J. M. Sugar beet for bioethanol production: An approach based on environmental agricultural outputs. **Energy Policy**, v. 55, p. 662–668, 2013.

SALGADO JUNIOR, A. P.; BONACIM, C. A. G.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região Nordeste do estado de São Paulo. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 11, n. 3, p. 21, 2009.

SAMPAIO, M. DE A. P. Goiás e suas sub-regiões canavieiras: Análise dos períodos recentes e atual (1975 - 2019). **Boletim Goiano de Geografia**, v. 39, p. 21, 2019.

SANTOS, H. F. DOS. Competitividade regional do setor sucroenergético no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Formação (online)**, v. 1, n. 25, p. 5–37, 2017.

SCHARLEMANN, J. P. W.; LAURANCE, W. F. How Green Are Biofuels? **Science**, v. 319, p. 43–45, 2008.

SESMERO, J. P.; PERRIN, R. K.; FULGINITI, L. E. Environmental efficiency among corn ethanol plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, n. 765, p. 634–644, 2012.

SILVA, G. M. C. D.; PÉRICO, A. E. Eficiência e sustentabilidade: uma análise econômica, social, ambiental e sustentável das usinas paulistas de cana-de-açúcar. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 3, p. 22, 2022.

SOARES, F. U.; GONÇALVES, R. J. DE A. F.; SPECIAN, V. A territorialização do monopólio capitalista canavieiro em Goiás, Brasil. **Estudos Geográficos**, v. 17, n. 1, p. 93–105, 2019.

SUEYOSHI, T.; KIRIHARA, Y. Efficiency measurement and strategic classification of Japanese banking institutions. **International Journal of Systems Science**, v. 29, n. 11, p. 1249–1263, 1998.

TEIXEIRA, A. C. R. et al. Public policies to implement alternative fuels in the road transport sector. **Transport Policy** 99, p. 345–361, 2020.

TORQUATO, S. A.; MARTINS, R.; RAMOS, S. DE F. Cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Eficiência econômica das regionais novas e tradicionais de produção. **Informações Econômicas**, v. 39, n. 5, p. 92–99, 2009.

UNICA. **Histórico de Produção e Moagem**. Disponível em: <<https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>>. Acesso em: 8 mar. 2021.

USDA. **Sugar and Sweeteners Yearbook Tables**. Disponível em: <[https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/#World Production, Supply, and Distribution](https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/#World%20Production,%20Supply,%20and%20Distribution)>. Acesso em: 23 mar. 2021.

VASCONCELLOS, V. A.; CANEN, A. G.; LINS, M. P. E. Identificando as melhores práticas operacionais através da associação benchmarking-dea: O caso das refinarias de petróleo. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 1, p. 51–67, 2006.

VERRI, R. A. et al. **Corte de cana manual x mecanizada: Um olhar na sustentabilidade**. Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. **Anais...2016**

XAVIER, C. E. O. **Análise da eficiência do setor sucroenergético brasileiro**. p. 164, 2014.