

Análise da eficiência econômica das regiões canavieiras do Estado de São Paulo utilizando Análise Envoltória de Dados (DEA) e Índice Malmquist

Recebimento dos originais: 03/01/2018
Aceitação para publicação: 03/07/2019

Wilson Milani Zambianco

Mestre em Engenharia de Produção pela EESC/USP

Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

Endereço: Avenida Trabalhador São-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt.

CEP 13566-590 - São Carlos – SP

E-mail: wmzambianco@gmail.com

Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto

Professora Associada do Departamento de Engenharia de Produção da EESC/USP

Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

Endereço: Avenida Trabalhador São-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt.

CEP 13566-590 - São Carlos – SP

E-mail: daisy@sc.usp.br

Resumo

O presente artigo propõe o uso do método Análise Envoltória de Dados – DEA para avaliar a eficiência econômica das microrregiões canavieiras do estado de São Paulo considerando as variáveis custo de produção de cana-de-açúcar, área cultivada dessa matéria-prima e número de pessoas empregadas no setor como variáveis de *input* e o valor da produção e o salário médio das pessoas empregadas no setor como *output*. O setor sucroenergético é um importante setor dentro da economia brasileira, e também um dos mais significativos para o estado de São Paulo. A partir da década de 2000, houve um crescimento expressivo da área cultivada com cana-de-açúcar, tanto em São Paulo quanto no Brasil, se expandindo para regiões anteriormente ocupadas por outras culturas. Assim, em busca de mensurar a eficiência econômica e comparar os resultados entre as regiões canavieiras do estado de São Paulo, o presente trabalho tem como objetivo identificar quais as regiões eficientes em converter seus fatores de produção em renda ao trabalho e ao uso da terra dentro do período de 2007 a 2014. Os resultados indicam que, de maneira geral, as regiões apresentaram um nível de eficiência baixo no período, que pode estar relacionado aos reflexos das crises que atingiram tanto a economia mundial como setor a partir de 2008. Destacaram-se como regiões mais eficientes aquelas em que houve expansão da cultura de cana-de-açúcar após o início da década de 2000.

Palavras-chave: Eficiência econômica, DEA, setor sucroenergético.

1. Introdução

A cultura de cana-de-açúcar se destaca como a principal atividade agrícola dentre as atividades econômicas dominantes no estado de São Paulo, o maior produtor dessa cultura no

Brasil. De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), no ano de 2016 a cultura de cana-de-açúcar respondeu por 57% do valor de toda a produção agrícola do estado. No mesmo ano, o setor sucroenergético empregou mais de 220 mil pessoas no estado de São Paulo, entre trabalhadores da área agrícola e da produção de etanol, açúcar e outros subprodutos, movimentando cerca de R\$ 560 milhões em renda aos trabalhadores do setor, segundo o Ministério do Trabalho e Emprego - MTE (2017).

A aceleração da expansão da cultura de cana-de-açúcar no território brasileiro ocorreu após a desregulamentação do setor sucroenergético, ocorrida em 1999. Segundo dados do IBGE (2017) a área plantada com cana-de-açúcar no Brasil cresceu 109% de 2000 a 2015; no estado de São Paulo, esse crescimento foi de 124%. Tal corrida pode também ser explicada por diversos fatores, como o aumento da demanda interna e externa por etanol combustível – provocado pela elevação da cotação do barril de petróleo no mercado internacional e pela introdução da tecnologia flex-fuel para veículos automotores no Brasil –, a valorização do preço do açúcar no mercado internacional, além da exploração do potencial da biomassa da cana-de-açúcar como fonte de energia renovável (GOLDEMBERG e LUCON, 2007; GONÇALVES, 2009; JANK, 2010; SEABRA e MACEDO, 2011). A partir de então, essa acelerada expansão da produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo – sobretudo na região oeste – provocou o aumento da concorrência por área de canavial, além da expansão sobre áreas de pastagens (TORQUATO, MARTINS, RAMOS, 2009). Segundo os autores, houve também a entrada novos grupos econômicos no setor e a introdução de modernos sistemas de produção, que juntos contribuíram para o aumento da eficiência produtiva através de melhores práticas na gestão de custos e de adequações técnicas e tecnológicas.

Considerando o grande investimento que houve ao longo da década de 2000, o avanço da produção de cana e crescimento do setor em várias regiões brasileiras e a complexidade dos custos de produção envolvendo a mudança do corte manual para o corte mecanizado, ainda são poucos os estudos que analisam os impactos do crescimento da cultura de cana-de-açúcar. Nesse sentido, destacam-se os estudos desenvolvidos por Rovere, Pereira, Simões (2011) e Moraes, Oliveira, Diaz-Chavez (2015). Os primeiros autores avaliaram as três décadas do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) no Brasil, período anterior à desregulamentação do setor. As principais conclusões mostram que houve benefícios diretos, como a geração de emprego local e a melhoria da segurança energética, além da redução da poluição do ar urbano com menores níveis de emissões de CO₂. Já o trabalho desenvolvido por Moraes, Oliveira, Diaz-Chavez (2015) analisou os impactos socioeconômicos da indústria

canavieira no Brasil, examinando as características da força de trabalho, remuneração e condições de trabalho. Os resultados encontrados mostram que juntos, os três setores-chave que compõem a indústria da cana no país (cultivo de cana-de-açúcar, a produção de açúcar e de produção de etanol) empregaram cerca de um milhão de trabalhadores em 2012, e comparando com outras culturas agrícolas, os trabalhadores do setor de cana-de-açúcar possuem melhores condições socioeconômicas. Contudo, ainda não há na literatura estudos que avaliam a eficiência econômica do avanço dessa cultura no estado de São Paulo.

A eficiência produtiva é um conceito amplamente utilizado na economia e pode ser definida como o valor máximo de um *output* resultante do uso de um dado conjunto de insumos (*inputs*) por uma determinada unidade de produção (FARRELL, 1957). Neste artigo, a eficiência econômica pode ser entendida como sendo os máximos rendimentos procedentes da produção de cana-de-açúcar e da mão-de-obra empregada nessa atividade resultantes da utilização dos fatores de produção disponíveis em determinada microrregião do estado de São Paulo. Dessa forma, propõe-se o uso do método Análise Envoltória de Dados – DEA para avaliar e comparar a eficiência econômica das microrregiões canavieiras do estado de São Paulo considerando as variáveis custo de produção de cana-de-açúcar, área cultivada dessa matéria-prima e número de pessoas empregadas no setor como variáveis de *input* do modelo e o valor da produção e o salário médio das pessoas empregadas no setor como *output*.

Portanto, o objetivo principal desse trabalho é identificar quais as regiões canavieiras do estado de São Paulo são eficientes em converter seus fatores de produção em renda ao trabalho e ao uso da terra. A partir do objetivo principal, é possível também analisar o nível de desempenho econômico do setor sucroenergético nas microrregiões do estado de São Paulo, além de buscar identificar as possíveis causas para a eficiência ou ineficiência em cada região. Dessa forma, a contribuição desse trabalho se dá por apresentar a eficiência relativa de cada região canavieira em converter seus fatores de produção em rendimentos, e abrir uma discussão acerca desse assunto.

2. Fundamentação teórica

2.1. O método DEA

O método de Análise Envoltória de Dados (DEA) baseia-se no conceito de eficiência produtiva descrito por Farrell em 1957, e foi proposto inicialmente por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) com a finalidade de avaliar o desempenho de determinadas unidades

tomadoras de decisão (Decision Making Units – DMUs), que por sua vez podem ser consideradas como um sistema que transforma um conjunto de entradas em um conjunto de saídas. Assim, o método DEA analisa a eficiência de uma DMU em converter insumos produtivos (*inputs*) em produtos (*outputs*), podendo ser definida também como uma técnica não paramétrica, ou seja, seus resultados não permitem inferência estatística, sendo válida somente para a amostra analisada. A ferramenta básica utilizada para operar o método é a programação matemática e seu principal resultado é a eficiência produtiva, podendo ser adaptado a outras utilizações. Os resultados da DEA permitem identificar as DMUs eficientes e as ineficientes, além de fornecer metas para que as DMUs ineficientes atinjam o grau de eficiência. Outro resultado fornecido pelo método são os benchmarks para cada DMU, além da contribuição relativa de cada *input* e *output*.

Há vários modelos que podem ser utilizados na aplicação da DEA, conforme levantado por Mariano e Rebelatto (2013). Segundo os autores, esses modelos podem se diferenciar de acordo com o tipo de retorno de escala, sua orientação ou a forma de se combinar *inputs* e *outputs*. Os modelos de retorno à escala são o CRS (Constant Returns to Scale – Retornos Constantes de Escala), ou CCR (em referência a Charnes, Cooper e Rhodes (1978)); e o VRS (Variable Returns to Scale – Retornos Variáveis de Escala), ou BCC (em referência a Banker, Charnes e Cooper (1984)). Já a respeito da sua orientação, os modelos podem ser radiais ou não-radiais. Os modelos radiais buscam a minimização dos *inputs* ou maximização dos *outputs* separadamente. A orientação ao *input* permite que o modelo determine o quanto ele deveria ser reduzido para ser otimizado, mantendo os valores do *output* constantes, enquanto os modelos orientados ao *output* permitem determinar o quanto ele pode ser aumentado sem interferir no nível atual dos *inputs*. Já os modelos não-radiais consideram a redução dos *inputs* e aumento dos *outputs* simultaneamente (COOPER, SEIFORD, TONE, 2007).

2.2. Análise da eficiência econômica de sistemas produtivos utilizando o método DEA

Vários estudos encontrados utilizaram o método DEA a fim de analisar a eficiência econômica de sistemas produtivos, mostrando que esse método pode ser bastante útil para mensurar a eficiência a partir de diversas perspectivas, como os trabalhos de Vicente (2012), Gerdessen; Pascucci (2013), Costa, et al. (2013), Gomes, et. al. (2015), Ye, et. al. (2016),

Alam, Sikder, Goulias (2004), Charles, Zegarra (2014), Li, et. al. (2015), Deilmann, et. al. (2016)

Vicente (2012) utilizou o método DEA orientado ao *input*, sob retornos constantes à escala, para mensurar os níveis de produtividade total de fatores e de eficiências técnica, alocativa e econômica na produção agrícola de lavouras do Brasil em 2006. Utilizando a quantidade produzida como *output*, e terra, trabalho, mecanização, fertilizantes, defensivos e investimentos em culturas perenes como *inputs*, o autor sugere que, de maneira geral, houve ineficiência técnica moderada e ineficiência alocativa forte. Constatou-se que a produção de lavoura poderia ter sido 5% maior, caso a eficiência técnica fosse atingida, além da sobre utilização de trabalho. A agricultura do estado de São Paulo era a única operando com eficiência econômica plena. Por fim, o autor aponta para um processo de convergência nos índices de produtividade e de eficiência em 2006 comparado com 1995.

Os autores Gerdessen; Pascucci (2013) utilizaram o método DEA em seu modelo de avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, considerando uma perspectiva multidimensional. O sistema utilizado pelos autores utiliza as três dimensões da sustentabilidade, definido por dois indicadores econômicos (valor adicionado e formação bruta de capital fixo), dois indicadores sociais (relação etária e treinamento/educação), e quatro indicadores ambientais (risco de erosão, intensidades de uso da terra para produção vegetal e animal e relevância das áreas irrigadas). O método DEA foi utilizado tanto da forma CRS quanto da forma VRS, dependendo de cada um dos cinco cenários baseados nas três dimensões da sustentabilidade. Assim, foi medida a eficiência dessas variáveis em 252 regiões agrícolas europeias, divididas em subconjuntos de regiões eficientes e não eficientes em cada um dos cinco cenários. A partir dos resultados, os autores concluíram que a combinação de uma perspectiva multidimensional com a ferramenta DEA permitiu operacionalizar o conceito complexo e sofisticado de sustentabilidade.

A fim de mensurar a eficiência da produção do biodiesel no Brasil, Costa, et al. (2013) avaliaram 13 diferentes *inputs* para a produção do combustível, utilizando DEA na versão VRS orientada ao *output*. Tais *inputs* estavam agrupados de acordo com cinco diferentes origens de matéria-prima para a produção de biodiesel: fontes residuais, extrativicultura, culturas perenes, culturas anuais mecanizadas e culturas anuais intensiva em trabalho manual. Os resultados mostraram que o maior custo associado com o processo de produção do biodiesel a partir de resíduos, assim como sua pequena escala de produção, é compensado

pelo seu menor custo de aquisição, além da sua disponibilidade imediata nos centros urbanos e também pelo grande potencial de mitigação de gases de efeito estufa.

Gomes, et. al. (2015) desenvolveram um modelo de desempenho econômico e outro socioambiental, utilizando DEA BCC, a fim de avaliar 21 modais de sistemas de produção de bovinos de corte, representados por 21 municípios em sete estados brasileiros. O modelo econômico teve por finalidade medir a capacidade de um sistema de produção para gerar receita com a preservação da floresta nativa, utilizando mão de obra, capital e despesas correntes como entradas. O modelo socioambiental utilizou o fator trabalho como *output*, de modo a avaliar a geração de benefícios econômicos, ambientais e sociais a partir dos custos de capital. Os resultados apontaram fontes de ineficiência em termos de trabalho de baixa qualificação e a utilização de touros de qualidade questionável, fatores que são comuns em sistemas extensivos, sendo estes alguns dos principais pontos de estrangulamento nos sistemas de produção animal como um todo.

O trabalho desenvolvido por Ye, et. al. (2016) aplicou o método DEA utilizando tanto a forma CRS quanto a forma VRS, além do Índice de Malmquist (IM), com base em uma análise de séries temporais, a fim de analisar a eficiência da produção e a tendência da indústria de açúcar da China no período de 2004 a 2013. As regiões analisadas foram as quatro principais províncias canavieiras (Guangxi, Yunnan, Guangdong e Hainan), que juntas representam cerca de 90% da produção chinesa de cana. As variáveis utilizadas foram os custos relacionados ao material, ao serviço e ao trabalho como entradas, e como saída foi utilizada a produção de cana por hectare. A análise revelou que a eficiência global da produção de cana na China foi relativamente baixa, e os escores resultaram em um impacto negativo sobre o desenvolvimento da indústria de açúcar chinesa. Além disso, a análise baseada no Índice Malmquist também demonstrou um declínio na tendência da produtividade da cana durante 2004-2013. Dessa forma, o estudo dos autores indica claramente que a produtividade da cana chinesa precisa de melhorias significativas.

Alam, Sikder, Goulias (2004) examinaram a eficiência técnica dos investimentos no desenvolvimento de infraestrutura regional de transportes de Bangladesh. Os autores utilizaram o modelo DEA-CRS orientado aos *inputs*, aplicado às variáveis de entrada – área, população, capital industrial e índice de acessibilidade de cada região – relacionadas ao produto interno bruto de cada um dos setores demandantes da infraestrutura de transportes (agropecuária, indústria, serviço e total), representando as variáveis de saída. Dessa forma, os autores usaram o método DEA para identificar os investimentos prioritários para cada região e

avaliar seus impactos relativos, sendo que os investimentos em regiões menos eficientes tendem a ser mais eficazes, pois apresentam uma taxa de retorno maior.

O trabalho de Charles, Zegarra (2014) utilizou um modelo DEA para construir um índice composto a fim de mensurar a competitividade das regiões do Peru em cinco pilares: (1) economia, (2) firmas, (3) governo, (4) infraestrutura e (5) pessoas. O método utilizado foi o DEA-BCC orientado ao *output*, e os resultados indicaram que as regiões costeiras são mais competitivas em relação às regiões montanhosas ou de selva. O modelo proposto foi útil para apontar algumas necessidades para uma abordagem unificada de modo a serem desenvolvidas estratégias para o aumento da produtividade de todas as regiões peruanas.

Li, et. al. (2015) analisam a produtividade total dos fatores da economia marítima de 11 cidades da costa chinesa durante o período chamado "11º Plano De Cinco Anos", analisando comparativamente as diferenças regionais de eficiência econômica nestas áreas. Os resultados mostram que o nível global de eficiência de desenvolvimento da economia marítima das cidades costeiras da China não é alto. De acordo com a decomposição da PTF, a maioria das regiões possui uma distribuição de recursos urbana razoável, sendo o progresso da tecnologia o principal impulso para o desenvolvimento da economia das regiões marítimas.

Por fim, Deilmann, et. al. (2016) estudaram o desempenho econômico das cidades e as suas implicações sociais e ambientais, buscando quantificar as vantagens do desempenho do crescimento e do tamanho, enquanto se considera o impacto das economias de escala. Para tal análise, os autores aplicaram a Análise Envoltória de Dados (DEA) a fim de estudar a eficiência dos recursos das cidades. Os dados utilizados foram resultados de uma pesquisa em 116 cidades da Alemanha, resultando em dois modelos distintos, um econômico e outro ecológico, a fim de permitir a identificação mais precisa da relevância dos parâmetros individuais durante o processo de avaliação. Os autores apresentaram os resultados na forma de um ranking de cidades acompanhado de uma matriz com a estimativa dos rateios de eficiência econômica e ecológica das cidades analisadas, a fim de compreender os fatores comuns que determinam o nível de eficiência, bem como aprender sobre a diferença qualitativa e características específicas das cidades nos quadrantes da matriz particulares.

3. Método

A fim de se atingir os objetivos propostos, foi construído um modelo representativo do sistema produtivo do setor sucroenergético. O modelo proposto busca desenvolver um critério

de mensuração da eficiência das microrregiões canavieiras do estado de São Paulo, sustentada pelo aspecto econômico utilizando o método DEA. A eficiência pode ser medida utilizando *inputs* produtivos (Lopes, 2014), como terra, capital, trabalho, sendo os *inputs* mais referenciados a mão-de-obra, área plantada, capital e insumos agrícolas. Como *output*, geralmente são utilizados a produção agropecuária, tanto em unidade física quanto monetária. Optou-se, dessa forma, por considerar como *inputs* os indicadores de produção, ou seja, as variáveis que representem valores de trabalho, terra e capital, enquanto os *outputs* são referentes às variáveis econômicas do setor.

A partir da literatura, foi possível selecionar uma cesta de variáveis que poderiam integrar a análise da eficiência, considerando a disponibilidade de dados e o maior período temporal. Procurou-se considerar as variáveis que representem os impactos do setor sucroenergético sobre o aspecto econômico das regiões. Nesse sentido, Bacchi, Caldareli (2015) apontam variáveis relacionadas aos aspectos de renda, tanto da remuneração da mão-de-obra quanto da remuneração da terra. Dessa forma, considerou-se como variáveis econômicas a renda média mensal dos trabalhadores do cultivo da cana-de-açúcar, e a remuneração da área cultivada, ou seja, o valor da produção por hectare de cana plantada. O universo da pesquisa se refere às microrregiões do estado de São Paulo que produzem cana-de-açúcar. Consideraram-se como regiões canavieiras as microrregiões do estado de São Paulo que possuíam pelo menos 1.000 hectares de área cultivada com cana-de-açúcar no ano de 2014. Assim, foram selecionadas as seguintes microrregiões: Adamantina, Andradina, Araçatuba, Araraquara, Assis, Auriflama, Avaré, Barretos, Batatais, Bauru, Birigui, Botucatu, Campinas, Catanduva, Dracena, Fernandópolis, Franca, Itapetininga, Ituverava, Jaboticabal, Jales, Jaú, Limeira, Lins, Marília, Moji Mirim, Nhandeara, Novo Horizonte, Ourinhos, Piracicaba, Pirassununga, Presidente Prudente, Ribeirão Preto, Rio Claro, São Carlos, São João da Boa Vista, São Joaquim da Barra, São José do Rio Preto, Tatuí, Tupã, Votuporanga.

Os dados considerados na pesquisa foram levantados por órgãos de pesquisa do estado de São Paulo e da União, relatórios técnicos e pesquisas científicas. Os dados relativos a produção de cana-de-açúcar, área plantada, área colhida e valor da produção são oriundos da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) realizada pelo IBGE (2017). Os dados referentes ao número de pessoas empregadas e salário estão disponíveis nas bases da Relação Anual de Informações Sociais e no Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (RAIS/CAGED) do MTE (2017). Os dados de custo de produção da cana-de-açúcar foram levantados pela equipe do Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas da Escola

Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (PECEGE/ESALQ/USP), nos relatórios apresentados à Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto “Campo Futuro”, e disponíveis em Marques et. al. (2009); Xavier et. al. (2009) e Pecege (2010-2015). No Quadro 1 são apresentadas as variáveis consideradas no modelo, incluindo a mensuração e a fonte de cada variável.

Quadro 1: Apresentação das variáveis do modelo.

Tipo de Variável	Dimensão	Variável	Mensuração da Variável	Fontes
<i>Input</i>	Trabalho	Pessoas empregadas	Número de pessoas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar / Produção de cana (mil toneladas)	RAIS/CAGED - MTE, 2017; PAM - IBGE, 2017
<i>Input</i>	Terra	Área plantada	Área plantada (ha) / Produção de cana (mil toneladas)	PAM - IBGE, 2017
<i>Input</i>	Capital	Custo de produção	Custo operacional total real (em 2014 R\$) / Produção de cana (mil toneladas)	MARQUES, ET. AL. (2009); XAVIER, ET. AL. (2009); PECEGE (2010-2015); PAM - IBGE, 2017
<i>Output</i>	Econômico	Valor da produção	Valor real (em 2014 R\$) da produção de cana-de-açúcar / Área plantada (ha)	PAM - IBGE, 2017
<i>Output</i>	Econômico	Salário médio	Salário mensal real (em 2014 R\$) das pessoas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar / Número de pessoas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar	RAIS/CAGED - MTE, 2017

Fonte - elaborado pelo autor.

Uma descrição das variáveis de *inputs* adotadas no modelo é apresentada a seguir. Optou-se por balancear as variáveis de *input* para evitar que um valor de *input* muito alto ou muito baixo interfira na eficiência de determinada microrregião. Dessa forma, as variáveis de trabalho, terra e capital foram divididas pela quantidade de cana produzida em cada microrregião, conforme mostrado na descrição de cada uma delas.

Essa variável é medida pelo número total de pessoas empregadas no cultivo de cana-de-açúcar sobre a quantidade de cana produzida (em mil toneladas) em cada ano. Os dados sobre o número de empregados foram coletados do banco de dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) fornecidas pelo Ministério do Trabalho (MTE), enquanto os dados de quantidade de cana produzida é disponibilizado pela Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados da RAIS/MTE relacionados aos trabalhadores do setor sucroenergético foram selecionados de acordo com a

classificação CNAE 2.0 (Classificação Nacional de Atividades Econômicas) das atividades econômicas pertencentes ao setor considerando o código CNAE subclasse 0113-0 (Cultivo de cana-de-açúcar). Pode ser representado pela Equação 1:

$$PE_j^i = \frac{PET_j^i}{PCT_j^i} \quad (1)$$

Onde:

PE_j^i é o número de pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar por tonelada de cana-de-açúcar produzida no ano i na microrregião j;

PET_j^i é o número total de pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar no ano i na microrregião j;

PCT_j^i é a quantidade de cana-de-açúcar produzida (em toneladas) no ano i na microrregião j.

Refere-se ao valor de área plantada (ha) sobre a quantidade de cana produzida (em mil toneladas), ambos fornecidos pela base de dados da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). É representada pela equação 2:

$$AP_j^i = \frac{APT_j^i}{PC_j^i} \quad (2)$$

Onde:

AP_j^i é a área plantada de cana-de-açúcar (em hectares) por tonelada de cana-de-açúcar produzida no ano i na microrregião j;

APT_j^i é a área total plantada de cana-de-açúcar (em hectares) no ano i na microrregião j;

PC_j^i é a quantidade de cana-de-açúcar produzida (em toneladas) no ano i na microrregião j.

Optou-se pelo uso da área plantada de cana-de-açúcar por ela representar o uso do solo por esta cultura, ou seja, a área em lavoura dessa atividade. Caso optasse pela área colhida, corria-se o risco de não alcançar toda a área dispendida para a produção de cana, pois não inclui as áreas de cana em plantio e em reforma. Isso pode ocorrer pois o plantio e reforma da cana pode ser feito utilizando o sistema chamado “ano e meio”. Nesse sistema, a lavoura de cana-de-açúcar somente será colhida após passar um ano e meio do seu plantio. Além disso, após a reforma do canavial, a área geralmente é cultivada com alguma cultura de verão antes do novo plantio de cana-de-açúcar, como soja ou amendoim (RUDORFF, et. al., 2005). Dessa forma, o intervalo entre a última colheita antes da reforma e a primeira colheita após o plantio será de dois anos.

Essa variável foi estimada considerando o Custo Operacional Total – COT real em R\$/t/ano, em valores de 2014, referentes ao estado de São Paulo. Esse valor é levantado pela equipe de custos de produção do Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (PECEGE), da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), em parceria com a Confederação Nacional da Agricultura (CNA). As variáveis monetárias foram inflacionadas com base no ano de 2014, considerando o Índice de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA, divulgado pelo IBGE (2017). O cálculo dessa variável pode ser representado pela Equação 3:

$$CP_j^i = [(COT_j^i \text{cana usina} \times \%usina_j^i) + (COT_j^i \text{cana forn} \times \%forn_j^i)] \quad (3)$$

Onde:

CP_j^i corresponde ao custo de produção (R\$, em valores de 2014) por tonelada de cana-de-açúcar produzida no ano i na microrregião j ;

$COT_j^i \text{cana usina}$ é o custo operacional total (R\$, em valores de 2014) por tonelada de cana-de-açúcar produzida no ano i na microrregião j correspondente à cana produzida pela usina;

$\%usina_j^i$ é a participação da cana produzida pela usina no ano i na microrregião j ;

$COT_j^i \text{cana forn}$ é o custo operacional total (R\$, em valores de 2014) por tonelada de cana-de-açúcar produzida no ano i na microrregião j correspondente à cana produzida por fornecedor;

$\%fornec_j^i$ é a participação da cana produzida por fornecedor no ano i na microrregião j ;

O custo operacional total calculado pelo PECEGE considera os custos com plantio, tratos culturais, colheita, administrativos e outros (MARQUES, 2009). A metodologia de cálculo adotada pela instituição também considera que os sistemas de produção de cana-de-açúcar adotados pela usina e pelos fornecedores são diferentes, principalmente no que tange em termos de produtividade, escala de produção, uso de subprodutos industriais como fertilizantes por parte da usina, época de colheita e configuração administrativa. Por essa razão, no cálculo da variável custo de produção considera-se uma média ponderada do Custo Operacional Total (COT) dos dois sistemas.

Optou-se por utilizar duas variáveis para a dimensão econômica, pois cada uma tem sua importância no impacto da atividade à sociedade: a primeira em relação à remuneração do detentor da terra, que é remunerado de acordo com sua área destinada ao plantio, e a segunda em relação à remuneração da força de trabalho das pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar. As variáveis são apresentadas a seguir:

Essa variável foi calculada com base no valor da produção real (R\$, em valores de 2014) sobre a área plantada de cana (ha), ambas disponibilizadas pela Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sua representação é dada em R\$ por hectare, e apresentada pela Equação 4:

$$VP_j^i = \frac{VPT_j^i}{APT_j^i} \quad (4)$$

Onde:

VPT_j^i é o valor médio da produção de cana-de-açúcar (em R\$ de 2014 por hectare) produzida no ano i na microrregião j

APT_j^i corresponde ao valor total da produção de cana-de-açúcar (em R\$ de 2014) produzida no ano i na microrregião j

APT_j^i corresponde ao total de área cultivada com cana-de-açúcar (ha), no ano i na microrregião j

A variável salário médio foi calculada utilizando os dados da Relação Anual de Informações Sociais – RAIS, fornecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego – MTE. Para calculá-la, foram utilizados os dados de salário real (R\$, em valores de 2014) das pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar (CNAE subclasse 0113-0)e o número de pessoas empregadas na mesma atividade, de acordo com a Equação 5:

$$SM_j^i = \frac{ST_j^i}{PET_j^i} \quad (5)$$

Onde:

SM_j^i é o salário médio (em R\$ de 2014) por pessoa empregada no ano i na microrregião j

ST_j^i é o salário total (em R\$ de 2014) recebido pelas pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar no ano i na microrregião j

PET_j^i é o número total de pessoas empregadas na atividade de cultivo de cana-de-açúcar no ano i na microrregião j

A variável salário médio além de ser uma variável econômica, também pode ser classificada como uma variável social, pois além de ser a renda do trabalhador e refletir o seu poder de compra, ela também determina o nível de acesso do trabalhador a bens e serviços, impactando em seu bem-estar social.

A análise de regressão linear múltipla é uma ferramenta econométrica que relaciona duas ou mais variáveis, onde uma variável dependente pode ser predita a partir das variáveis independentes. Nesse trabalho essa análise foi aplicada a partir de duas óticas: uma econômica e uma social. As estimativas foram baseadas a partir de uma função de produção Cobb-Douglas modificada, conforme demonstrado pela Equação 6:

$$Y = F(K, L, A) = K^\alpha L^\beta A^\gamma \quad (6)$$

Onde:

Y é o produto

K é o insumo

L é o trabalho

A é a terra

Nesse modelo, K é representado pelo custo de produção, que corresponde ao dispêndio monetário necessário para manter a atividade, L corresponde à força de trabalho empregada e é representado pelo número de pessoas empregadas, e A é representada pela área plantada, que corresponde à área ocupada pela lavoura de cana-de-açúcar, ou seja, o uso da terra por essa cultura. Considerando os aspectos sócio-econômicos da análise, os produtos são representados pelo valor da produção e pelo salário médio dos trabalhadores. Sendo assim, foram estimadas duas equações para o modelo econométrico, conforme demonstrado pelas Equações 7 e 8:

$$\ln Y_{valor\ produção} = \beta_0 + \beta_1 \ln K + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln A + \varepsilon \quad (7)$$

$$\ln Y_{salário} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln K + \gamma_2 \ln L + \gamma_3 \ln A + \varepsilon \quad (8)$$

Onde:

$\alpha_n, \beta_n, \gamma_n, \delta_n$ ($n = 0, \dots, 3$) são os coeficientes estimados

$Y_{valor\ produção}$ é o valor da produção

$Y_{salário}$ é o salário médio dos trabalhadores do setor

K é o custo de produção

L é o número pessoas empregadas por tonelada de cana

A é a área plantada com cana-de-açúcar

Os modelos foram estimados com dados configurados em painel, considerando a transformação dos valores das variáveis em logaritmos naturais, a fim de se obter a sua

elasticidade. A estimativa dos modelos foi realizada através do software estatístico Stata® 12.1, considerando os métodos de Mínimos Quadrados Ordinários – MQO e Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis – MQGF, sendo que esse último método permite a estimativa do modelo com as correções da presença de autocorrelação dentro de painéis e correlação transversal e heterocedasticidade em painéis.

O método DEA mostra qual o nível de eficiência de uma DMU, de acordo com seus *inputs* e *outputs*, em relação às outras DMUs. Desse método, resulta um indicador que varia de zero a um, sendo que somente as DMUs que obtiverem um índice de eficiência igual a um são efetivamente eficientes.

O modelo considerado nesse trabalho é o DEA-BCC orientado aos *outputs*. De acordo com Coelli et. al. (2005), não é recomendado utilizar o modelo CCR em mercados que possuem algum grau de imperfeição ou que sejam regulamentados, pois as eficiências técnicas e de escala podem se confundir. O mercado sucroenergético é desregulamentado no Brasil desde 1999, conforme Moraes (2000), porém, possui grandes variações de tamanho entre as regiões do estado de São Paulo. Dessa forma, para esses tipos de mercado deve-se considerar as variações de escala no modelo, e o modelo BCC cumpre com essa exigência.

Assim, é possível escrever o modelo em linguagem matemática, de acordo com a Equação 9:

$$\min E_0 = \frac{\sum v_i x_{i0}}{\sum u_j y_{j0}} - w \quad (9)$$

Sujeito às equações:

$$\frac{\sum v_i x_{ik}}{\sum u_j y_{jk}} \geq 1, k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon, \forall j, i \quad (11)$$

Onde:

x_i é a quantidade do *input* i

y_j é a quantidade do *output* j

v_i é a utilidade (peso) do *input* i

u_j é a utilidade (peso) do *output* j

w é a variável de escala

ε é um número não arquimediano (muito próximo de zero)

Nesse modelo, a eficiência é calculada como sendo o inverso da função objetivo, ou seja, a eficiência é igual a $1/E$. Como nesse estudo busca-se o máximo da eficiência

econômica e social, dados os *inputs* disponíveis, busca-se também os pontos ótimos de utilização dos *inputs* de cada microrregião, por isso sua orientação ao *output*. Charnes, Cooper, & Rhodes (1978) afirmam que esse é um problema fracionário de difícil solução, mas que pode ser resolvido se transformado em uma função linear quando se considera que o denominador da função objetivo é igual a um. Esse tipo de problema é chamado de problema dos multiplicadores. Assim, o modelo pode ser representado pela Equação 12:

$$\min E_0 = \sum_{j=1}^n v_j x_{ij} - w \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m u_i y_{i0} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m u_i y_{ij} - \sum_{j=1}^n v_j x_{ij} + w \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, z \quad (14)$$

$$u_i \text{ e } v_j \geq \varepsilon \quad (15)$$

w sem restrição de sinal

Considerando que os dados das DMUs estão dispostos ao longo de uma série histórica, ou seja, são dados em painel, pode-se realizar a análise da eficiência das DMUs por meio da análise de janela (*window analysis*) a fim de incluir o fator tempo dentro da análise. A análise de janela possui uma ideia semelhante à de médias móveis. De acordo com Cooper, Seiford e Tone (2007), a análise de janela consiste em múltiplas aplicações do DEA com DMUs de vários anos juntos. Segundo os autores, uma janela é composta por k observações de n DMUs, que na aplicação do DEA são consideradas como k diferentes DMUs, se repetindo em cada troca de períodos, sendo k o número de períodos e n o número de DMUs. Considerando que o modelo proposto está disposto em dados em painel, sendo 41 microrregiões ao longo de 8 anos (2007 – 2014), temos que $n = 41$ e $k = 8$. Assim, o modelo proposto foi composto por 4 janelas ($w = 8 - 5 + 1 = 4$), com amplitude de 5 anos por janela ($p = \frac{8+1}{2} = 4,5 \cong 5$), totalizando 205 DMUs em cada janela ($d = 41 * 5 = 205$). O horizonte temporal das janelas é apresentado no Quadro 2:

Quadro 2 - Apresentação do horizonte temporal das janelas do modelo.

Janela	Amplitude
1	2007 - 2011
2	2008 - 2012
3	2009 - 2013
4	2010 - 2014

A fim de medir as mudanças de produtividade total dos fatores (PTF) Cooper, Seiford e Tone (2007) sugerem o uso de uma ferramenta intertemporal, o Índice Malmquist-DEA. Esse índice é formado pelo produto de dois sub-índices: o índice de mudança tecnológica e o índice de mudança de eficiência técnica, sendo o primeiro a mensuração do deslocamento da fronteira de eficiência e o segundo a amplitude da eficiência das DMUs em dois períodos.

O Índice Malmquist (IM) pode ser representado de acordo com a Equação 16:

$$IM_0 = \sqrt{\frac{d_0(x^t, y^t)}{d_0(x^0, y^0)} \frac{d_t(x^t, y^t)}{d_t(x^0, y^0)}} \quad (16)$$

Para valores de $IM_0 > 1$ indicam aumento da PTF e para valores $IM_0 < 1$ sinalizam para um decréscimo da PTF.

O índice pode ser decomposto a fim de se obter os efeitos de mudança tecnológica (AT) que é a mensuração do deslocamento da fronteira de eficiência, e também os efeitos de mudança de eficiência produtiva (AE) que é a amplitude da eficiência das DMUs em dois períodos. As mudanças de tecnologia e de eficiência produtiva podem ser representadas respectivamente pelas Equações 17 e 18:

$$AT_0 = \frac{d_t(x^t, y^t)}{d_0(x^0, y^0)} \quad (17)$$

$$AE_0 = \sqrt{\frac{d_0(x^t, y^t)}{d_t(x^t, y^t)} \frac{d_0(x^0, y^0)}{d_t(x^0, y^0)}} \quad (18)$$

Assim, é possível alcançar o objetivo proposto pelo trabalho, de modo a calcular e encontrar as eficiências econômico-sociais das regiões canavieiras de cada uma das microrregiões do Estado de São Paulo.

4. Resultados

4.1. Resultados da análise econométrica

Para a análise econométrica foram utilizados os dados em painel das 41 microrregiões do estado de São Paulo definidas como regiões canavieiras ao longo dos anos de 2007 a 2014, a fim de modelar matematicamente as variáveis envolvidas na análise e verificar o nível de contribuição das variáveis de *input* a cada uma das variáveis de *output*.

4.1.1. Resultados da regressão da variável dependente “valor da produção”

No modelo econômico foi estimada uma função considerando como variável dependente o valor da produção, e como variáveis independentes as variáveis representativas de trabalho, terra e capital. Os resultados da regressão são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Resultados das estimativas do modelo utilizando “valor da produção” como variável dependente.

	MQO	MQGF
Intercepto	-0,710***** (0,440)	0,981***** (0,219)
Custo de Produção	1,037* (0,000)	0,874* (0,000)
Área plantada	-0,993* (0,000)	-0,937* (0,000)
Pessoas empregadas	0,009***** (0,423)	0,003***** (0,616)
R ²	0,129	-
Wald Chi ² (gl) ou F (gl)	184,250* (0,000)	219,800* (0,000)

Obs: Nível de significância: * 0,001; ** 0,01; *** 0,05; **** 0,1; ***** não significante.

Os resultados demonstram que as variáveis custo de produção e área plantada são significativas a 99,9%, enquanto a variável pessoas empregadas é não-significante para os dois modelos. Das variáveis significativas, nos dois modelos a variável custo de produção possui relação positiva com a variável dependente enquanto a variável área plantada possui relação negativa. Tais resultados demonstram que quando há um aumento nos custos de produção das microrregiões, o valor da produção responde positivamente, buscando a manutenção das margens dos produtores; já quanto ocorre um aumento da área plantada sem um aumento de volume de cana-de-açúcar produzida, os produtores tem um retorno menor da sua atividade.

4.1.2. Resultados da regressão da variável dependente “salário médio”

Considerando a variável independente representado pelo salário médio, denominou-se o modelo de econômico/social, pois considera-se que essa variável é um *output* tanto

econômico quanto social. Os resultados das estimativas da função desse modelo são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Resultados das estimativas do modelo utilizando “salário médio” como variável dependente.

	MQO	MQGF
Intercepto	-2,499** (0.003)	1,202***** (0.107)
Custo de Produção	0,834* (0.000)	0,526* (0.000)
Área plantada	0,186*** (0.044)	0,048***** (0.471)
Pessoas empregadas	0,024*** (0.033)	0,040* (0.000)
R ²	0,191	-
Wald Chi ² (gl) ou F (gl)	154,980* (0.000)	71,970* (0.000)

Obs: Nível de significância: * 0,001; ** 0,01; *** 0,05; **** 0,1; ***** não significante.

De acordo com os resultados apresentados, todas as variáveis independentes do modelo MQO foram significativas, sendo o custo de produção significativo a 99,9% e as demais a 95%, enquanto no modelo MQGF a variável área plantada não foi significante, enquanto as demais foram significativas ao nível de 99,9%. Em ambos os modelos todas as variáveis apresentaram relação positiva com a variável salário médio, sendo que o parâmetro da variável custo de produção foi o maior para os dois modelos. Considerando que a variável salário médio compõe a formação do custo de produção, o valor desse parâmetro mostrou a alta dependência entre as variáveis. Em relação às demais variáveis, nota-se que a relação positiva indica que o salário médio tende a ser maior nas regiões onde há menor produtividade e maior uso de mão-de-obra.

4.2. Resultados da Análise Envoltória de Dados (DEA)

No modelo proposto foram adotados o número de pessoas empregadas no setor, a área plantada de cana-de-açúcar e o custo de produção como variáveis de *input*, e o valor da produção e o salário médio das pessoas empregadas no setor como variáveis de *output*. Os índices de eficiência desse modelo podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da Análise de Janela para o Modelo Econômico

Ranking de eficiência	Microrregião	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Eficiência Média
1	Marília	0,947	0,957	0,947	0,947	0,949
2	Jales	0,770	0,851	0,893	0,819	0,832
3	Votuporanga	0,840	0,834	0,817	0,788	0,820
4	Andradina	0,727	0,846	0,832	0,788	0,797
5	Tupã	0,714	0,792	0,838	0,841	0,795
6	Tatuí	0,711	0,793	0,779	0,732	0,753
7	São Carlos	0,692	0,723	0,754	0,748	0,729
8	Auriflama	0,747	0,741	0,736	0,692	0,729
9	Ituverava	0,672	0,745	0,740	0,721	0,719
10	Nhandeara	0,691	0,729	0,744	0,700	0,715
11	Limeira	0,701	0,725	0,743	0,693	0,715
12	Catanduva	0,679	0,719	0,737	0,694	0,707
13	Bauru	0,700	0,732	0,717	0,666	0,703
14	Assis	0,665	0,691	0,714	0,721	0,697
15	Piracicaba	0,649	0,711	0,719	0,695	0,693
16	Moji Mirim	0,700	0,685	0,678	0,664	0,681
17	Avaré	0,650	0,648	0,688	0,737	0,680
18	Araçatuba	0,666	0,684	0,690	0,652	0,673
19	Jaboticabal	0,634	0,668	0,693	0,696	0,672
20	Dracena	0,702	0,675	0,678	0,631	0,671
21	Botucatu	0,645	0,661	0,685	0,679	0,667
22	Pirassununga	0,630	0,646	0,685	0,710	0,667
23	São José do Rio Preto	0,629	0,651	0,677	0,680	0,659
24	São Joaquim da Barra	0,635	0,644	0,671	0,678	0,657
25	Adamantina	0,648	0,655	0,660	0,632	0,649
26	Presidente Prudente	0,608	0,632	0,652	0,660	0,638
27	Araraquara	0,540	0,601	0,679	0,736	0,635
28	Ribeirão Preto	0,599	0,618	0,622	0,644	0,620
29	Lins	0,631	0,615	0,620	0,593	0,615
30	Itapetininga	0,627	0,600	0,615	0,609	0,613
31	São João da Boa Vista	0,591	0,610	0,619	0,609	0,607
32	Birigui	0,628	0,620	0,608	0,572	0,607
33	Barretos	0,544	0,583	0,639	0,656	0,604
34	Campinas	0,581	0,590	0,612	0,624	0,601
35	Ourinhos	0,582	0,586	0,589	0,626	0,595
36	Fernandópolis	0,519	0,581	0,594	0,646	0,583
37	Novo Horizonte	0,502	0,598	0,611	0,624	0,582
38	Jaú	0,566	0,552	0,568	0,582	0,567
39	Batatais	0,520	0,551	0,561	0,577	0,552
40	Rio Claro	0,515	0,513	0,534	0,575	0,534
41	Franca	0,568	0,542	0,479	0,453	0,508

Fonte - elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Podemos constatar a partir dos resultados que as regiões mais eficientes foram Marília, Jales e Votuporanga. De maneira geral os resultados foram relativamente baixos, se destacando somente essas três regiões que apresentaram eficiência média acima de 0,8. Essas três regiões fazem parte da chamada região de expansão, ou seja, são microrregiões que iniciaram ou intensificaram a atividade de cana-de-açúcar a partir dos anos 2000. É interessante notar que grandes regiões tradicionais, como por exemplo, Piracicaba, Jaboticabal, Ribeirão Preto e Jaú apresentaram médias de eficiência relativamente baixas, abaixo do índice de 0,7. Tais resultados podem indicar que a expansão das regiões mais jovens foi realizada utilizando estruturas modernas e mais eficientes, buscando uma redução nos custos de produção e um aumento da produtividade, resultando em melhores índices de eficiência econômica, enquanto as regiões tradicionais podem ter mantido uma estrutura mais antiga ou terem realizado reformas ao longo do tempo que demandaram investimentos, impactando nos custos e resultando em menores índices de eficiência econômica. Esse fator pode ser exemplificado considerando a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar, onde, de acordo com a lei estadual n.º 11.241, as usinas terão um prazo de transição até 2021 para as áreas mecanizáveis ou até 2031 para as áreas não mecanizáveis. Dessa forma, as usinas localizadas nas áreas de expansão já foram projetadas para atenderem esses requisitos, enquanto as usinas localizadas nas áreas tradicionais tiveram que realizar toda uma mudança de estrutura para se adequarem a essa nova realidade. Contudo, as regiões tradicionais são as que possuem maiores oportunidades de melhoria de eficiência, podendo aproveitar as ferramentas que programas como o RenovaBio ou certificações oferecem para se tornarem mais eficientes.

A tabela 4 a seguir apresenta uma relação entre a taxa anual de crescimento da produção entre 2000 e 2015 e o ranking de eficiência econômica calculado pelo método DEA.

Tabela 4: Taxa de crescimento anual da produção de cana-de-açúcar das microrregiões canavieiras do estado de São Paulo entre 2000 e 2015 e sua respectiva posição no ranking de eficiência.

Microrregião	Taxa anual de crescimento da produção (2000-2015)	Ranking de eficiência
Dracena	47.7%	20
Jales	34.7%	2
Tupã	33.7%	5
Votuporanga	31.2%	3

Nhandeara	18.6%	10
Marília	14.7%	1
Itapetininga	14.2%	30
Presidente Prudente	13.1%	26
Andradina	13.0%	4
Fernandópolis	12.9%	36
Avaré	11.8%	17
São José do Rio Preto	11.0%	23
Barretos	9.2%	33
Lins	9.1%	29
Novo Horizonte	9.1%	37
Adamantina	7.3%	25
Bauru	5.9%	13
Franca	5.8%	41
Ituverava	5.6%	9
Assis	5.0%	14
Batatais	4.8%	39
Birigui	4.8%	32
São João da Boa Vista	4.6%	31
Araçatuba	4.4%	18
São Carlos	4.3%	7
Catanduva	4.1%	12
Auriflama	3.8%	8
Botucatu	3.6%	21
Ourinhos	3.3%	35
Araraquara	3.2%	27
Pirassununga	3.2%	22
Jaboticabal	2.8%	19
Tatuí	2.8%	6
Rio Claro	2.7%	40
São Joaquim da Barra	2.7%	24
Jaú	2.2%	38
Campinas	1.7%	34
Moji Mirim	1.4%	16
Ribeirão Preto	1.2%	28
Limeira	1.0%	11
Piracicaba	0.6%	15

Fonte – IBGE (2017); resultados da pesquisa.

Foi possível notar que as regiões canavieiras mais “jovens”, ou seja, aquelas que tiveram uma recente expansão da produção de cana medida pela sua taxa de crescimento, foram aquelas que apresentaram os maiores indicadores de eficiência. Destaca-se que dentre as dez microrregiões com as maiores taxas de crescimento de produção de cana-de-açúcar

figuram os cinco primeiros e o décimo colocado no ranking de eficiência. Uma microrregião que pode servir de exemplo é Jales: com uma taxa de crescimento anual de produção de 34,7%, essa microrregião apresenta a segunda maior taxa de crescimento, e também ocupa a segunda posição do ranking do modelo de eficiência econômica. Por outro lado, observa-se que algumas das microrregiões que apresentaram as menores taxas de crescimento de produção também estão nas últimas posições do ranking de eficiência. É o caso, por exemplo, da microrregião de Jaú, que apresentou um crescimento anual de produção de 2,2% - a sexta mais baixa - e ocupou a 38^a posição no ranking do modelo econômico. Portanto, tal cenário reforça a evidência que, de maneira geral, as regiões de expansão da cultura de cana-de-açúcar possam ser mais eficientes em transformar fatores de produção em melhores indicadores de renda do que as regiões mais tradicionais.

Em relação à análise da produtividade dos fatores, observa-se que no ano de 2008 – que foi afetado pela crise econômica mundial – o Índice Malmquist apresentou queda em quase todas as microrregiões, acumulando uma redução média de 3% em relação a 2007, conforme pode ser observado na Figura 1. Após isso, houve um grande aumento do índice no ano de 2009, impulsionado pela melhoria no indicador de mudança tecnológica, ou seja, a adoção de novas práticas. Esse índice se manteve praticamente constante em patamares próximos a 1,10 nos anos seguintes até que por fim em 2014 apresentou uma queda mais acentuada, impulsionado também pelo indicador de mudança tecnológica. Nesse ano, se aprofundaram as crises tanto da economia brasileira quanto do setor sucroenergético, e pode ter resultado na menor utilização de novas tecnologias pelo setor.

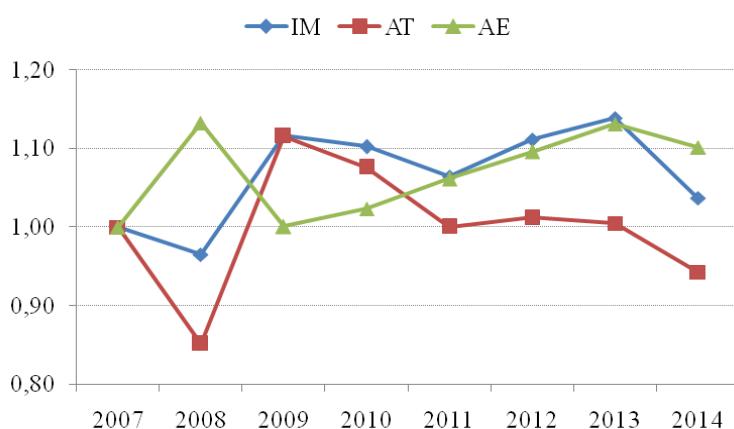


Figura 1: Média geral do Índice de Malmquist (IM), da mudança tecnológica (AT) e da mudança da eficiência produtiva (AE) do modelo econômico.

Fonte - elaborado pelos autores a partir dos resultados da pesquisa.

A partir dos resultados apresentados, foi possível identificar que o modelo econômico apresentou baixos níveis de eficiência para as regiões. Uma justificativa para esse fato pode ser explicado pelo período escolhido pela análise: entre os anos 2007 e 2014. Esse período foi marcado por fortes crises na economia mundial e também no setor sucroenergético. Santos, et. al. (2016) afirma que as sucessivas crises após 2008 desencadearam uma persistente dificuldade financeira, endividamento e baixa lucratividade em todo o setor. Nesse período também ocorreu uma grande desvalorização dos preços do açúcar entre 2012 e 2015 e do etanol até meados de 2015. Nesse contexto, cerca de sessenta empresas cadastradas no MAPA em 2009 encerraram as atividades até o ano de 2013 no país, conforme cita Santos, et. al. (2016). A soma desses fatores provocaram uma menor remuneração da produção de cana e também um nível de emprego do setor menor, afetando a eficiência econômica das regiões canavieiras do estado de São Paulo.

5. Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo identificar e analisar as regiões canavieiras do estado de São Paulo que foram eficientes em transformar os fatores de produção – trabalho, capital e área plantada – em indicadores econômicos entre os anos de 2007 e 2014. Foi montado um modelo utilizando o método DEA a fim de realizar a análise da eficiência econômica, considerando as regiões canavieiras do estado de São Paulo como DMUs. As variáveis de *input* representaram cada um dos fatores de produção: trabalho (número de trabalhadores), capital (custo de produção) e terra (área plantada), todas em relação ao volume produzido em cada região. As variáveis de *output* foram representadas pelas variáveis de valor da produção e salário médio.

Os resultados do modelo DEA apontam para uma ineficiência de maneira geral do setor, podendo ser em decorrência dos reflexos das crises que atingiram tanto a economia mundial como setor a partir de 2008, conforme apontado pela análise do Índice de Malmquist. De forma geral, os resultados demonstraram que determinadas regiões, sobretudo aquelas áreas de expansão, possuem um nível de eficiência maior que as tidas como tradicionais. Isso pode demonstrar, por um lado, que o setor cresceu de maneira mais eficiente nas regiões de expansão, resultando em melhores níveis de indicadores econômicos. Por outro lado, o baixo nível de eficiência apresentado pelas regiões mais tradicionais permite inferir também que o

setor ainda tem muitas deficiências em relação aos seus índices de econômicos, necessitando corrigi-las para um coerente desenvolvimento do setor.

Como contribuição teórica deste artigo, destaca-se a utilidade do método DEA na análise da eficiência econômica de um sistema produtivo, nesse caso, a cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Além disso, contribui também para a discussão acerca dos impactos econômicos e sociais decorrentes da expansão da cultura de cana-de-açúcar. É importante destacar que o modelo proposto representa uma simplificação da situação do setor sucroenergético, existindo outros fatores e indicadores que também podem influenciar a eficiência de cada região. Ainda assim, esse trabalho é relevante na finalidade de quantificar e comparar a eficiência das regiões produtoras do estado de São Paulo. Algumas limitações foram encontradas no decorrer da realização deste trabalho, sendo a mais relevante a indisponibilidade de mais dados estatísticos do setor sucroenergético. A fim de propor estudos futuros, sugere-se a aplicação do modelo a outras regiões geográficas e também a outros setores produtivos agropecuários.

6. Referências

- ALAM, J.; SIKDER, S.; GOULIAS, K. Role of Transportation in Regional Economic Efficiency in Bangladesh: Data Envelopment Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1864, p. 112–120, 2004.
- BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, entre 2005 e 2009. *Nova Economia*, v. 25, n. 1, p. 209–224, 2015.
- CHARLES, V.; ZEGARRA, L. F. Measuring regional competitiveness through Data Envelopment Analysis: A Peruvian case. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 11, p. 5371–5381, 2014.
- CHARNES, A.; COOPER, W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978.

COOPER, W. W., SEIFORD, L. M., & TONE, K. *Data Envelopment Analysis: A comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. 2 ed. Springer US. 2007

COSTA, A. et al. Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 407–412, 2013.

DEILMANN, C. et al. Data envelopment analysis of cities – Investigation of the ecological and economic efficiency of cities using a benchmarking concept from production management. *Ecological Indicators*, v. 67, p. 798–806, 2016.

FARRELL, M. J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, vol. 120, no. 3, pp. 253–290, 1957.

GERDESSEN, J. C.; PASCUCCI, S. Data Envelopment Analysis of sustainability indicators of European agricultural systems at regional level. *Agricultural Systems*, v. 118, p. 78–90, 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOMES, E. G. et al. Economic and socio-environmental performance assessment of beef cattle production systems: a data envelopment analysis (DEA) approach with weight restrictions. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 44, n. 6, p. 219–225, 2015.

GONÇALVES, D. B. Considerações sobre a expansão recente da lavoura canavieira no Brasil. *Informações Econômicas*, v. 39, n. 10, p. 70-82, 2009.

IBGE, *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Divisões Regionais do Brasil. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/2231-np-divisoes-regionais-do-brasil/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>>. Acesso em: 24 set. 2016.

IBGE, *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?&t=series-historicas>>. Acesso em: 07 set. 2017.

IBGE, *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acesso em: 07 set. 2017.

JANK, M. S. A Globalização e o Setor Sucroenergético Brasileiro. *Canasul* 2010. Campo Grande: UNICA. 16 ago. 2010.

LI, J. et al. Research on the Total Factor Productivity and Decomposition of Chinese Coastal Marine Economy: Based on DEA-Malmquist Index. *Journal of Coastal Research*, v. 73, p. 283–289, Mar. 2015.

LOPES, B. A. Ecoeficiência na Agropecuária: uma aplicação de análise envoltória de dados - DEA nos municípios brasileiros da Região Norte. 2014. *Dissertação (mestrado)*, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2014.

MARIANO, E. B., REBELATTO, D. A. Transformação de riquezas produzidas em qualidade de vida: uma análise por envoltória de dados da eficiência de Estados-Nação. *Simpósio de Engenharia de Produção - XX SIMPEP*, 14 f. Bauru, 2013.

MARQUES, P.V. (Coord.) Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. *Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA*. 194 p. 2009.

MORAES, M. A. F. D. *A desregulamentação do setor sucroalcooleiro do Brasil*. Caminho Editorial. 238 p. Americana, 2000

MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C. R.; DIAZ-CHAVEZ, R. A. Socio-economic impacts of Brazilian sugarcane industry. *Environmental Development*, v. 16, p. 31–43, 2015.

MTE, *Ministério do Trabalho*. Bases Estatísticas RAIS e CAGED. Disponível em: <<http://bi.mte.gov.br/bgcaged/inicial.php>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: safra 2009/2010. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. 100 p. 2010.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento da safra 2010/2011. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. 141 p. 2011.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento da safra 2011/2012. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. 50 p. 2012.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento da safra 2012/2013. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. 67 p. 2013.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: Fechamento da safra 2013/2014. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura

“Luiz de Queiroz”, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. 54 p. 2014.

PECEGE, *Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas*. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto “Campo Futuro”. 78 p. 2015.

ROVERE, E. L. L.; PEREIRA, A. S.; SIMÕES, A. F. Biofuels and Sustainable Energy Development in Brazil. *World Development*, v. 39, n. 6, p. 1026–1036, 2011.

RUDORFF, ET. AL. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano-safra 2003/04. *Agric. São Paulo*, v. 52, n. 1, p. 21-39, 2005.

SANTOS, G. R. et. al. A agroindústria canavieira e a produção de etanol no Brasil: características, potenciais e perfil da crise atual. In: SANTOS, G. R. *Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas*. Brasília: Ipea, 2016. cap. 1, p. 17-46.

SÃO PAULO. Lei n.º 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/norma/?id=217>>. Acesso em 07 nov. 2017.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 1, p. 421-428, 2011

TORQUATO, S. A., MARTINS, R., RAMOS, S. F. Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: eficiência econômica das regiões novas e tradicionais de produção. *Informações Econômicas*, v.39,n.5, p.92-99, mai. 2009.

VICENTE, J. R. Produtividade total de fatores e eficiência no setor de lavouras da agricultura brasileira. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 9, n. 3, p. 303-324, 2012.

XAVIER, C.E.O.; ZILIO, L.B.; SONODA, D.Y.; MARQUES, P.V. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: safra 2008/2009. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. *Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA*. 82 p. 2009.

YE, J. et al. Evaluating Sugarcane Productivity in China over Different Periods Using Data Envelopment Analysis and the Malmquist Index. *Sugar Tech*, v. 18, n. 5, p. 478–487, Apr. 2016.