

# **APLICAÇÃO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (AED) NA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL RELATIVA ENTRE USINAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NO TERRITÓRIO BRASILEIRO**

**ALEXANDRE P. SALGADO JUNIOR<sup>1</sup>, FABIO V. CARLUCCI<sup>2</sup>, JULIANA C. NOVI<sup>3</sup>**

**RESUMO:** Este estudo tem por objetivo analisar o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil na safra 2008/2009. Para tanto, realizou-se um estudo de eficiência operacional, por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados (AED), na qual foi possível identificar as usinas mais eficientes dentre um universo de 355 e classificá-las por tamanho e localização. A análise quantitativa sugere que existe maior concentração de usinas classificadas como eficientes e de tamanho grande, localizadas no estado de São Paulo. Objetivando uma análise em profundidade, foi realizado um estudo de múltiplos casos em um grupo de usinas. Conclui-se que a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar depende da variável tamanho, na medida em que as usinas de maior porte tendem a investir mais em tecnologias que proporcionam maior ganho de eficiência operacional. A eficiência também depende da variável localização, na medida em que o estado de São Paulo apresenta condições edafoclimáticas mais favoráveis à extração de uma cana-de-açúcar com maior teor de sacarose, que, consequentemente, pode influenciar na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar.

**PALAVRAS-CHAVE:** usinas de cana-de-açúcar, análise envoltória de dados (AED), eficiência operacional.

## **DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (DEA) APPLICATION FOR THE RELATIVE EVALUATION ON THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF SUGAR CANE MILLS IN BRAZIL**

**ABSTRACT:** The study aims to analyze the impact of the variables size and location over the operational efficiency of sugarcane mills producing sugar and ethanol in Brazil year 2008/2009. Data concerning total milling and total production of sugar and ethanol was collected regarding Brazilian sugar cane mills. An operational efficiency ranking was developed, applying Data Envelopment Analysis (DEA) technique, through which was possible to verify which were the most efficient among 355 sugarcane mills and, therefore, compare the variables size, location and operational efficiency among the Brazilian mills. The quantitative analysis suggests that among the efficient groups, there is a major concentration of larger mills, located in the state of São Paulo. Aiming an in-depth analysis, a multiple-case study was conducted in a group of sugarcane mills, and interviews with experts in the sugarcane industry were developed. Therefore, the conclusion is that operational efficiency of sugarcane mills depends on the variable location, as larger mills tend to invest more in technologies that provide major gain in operational efficiency. The operational efficiency depends also on the location of the sugarcane mill, as the state of São Paulo provides favorable edaphoclimatic conditions for the juice extraction of sugarcane with a higher level of sucrose content, hence possibly having influence over the operational efficiency.

**KEY-WORDS:** sugar cane plants factories, data envelopment analysis (DEA), operational efficiency.

<sup>1</sup> Prof. Dr, Depto. de Administração, Universidade de São Paulo / Ribeirão Preto - SP, Fone: (16) 3315-0501, [asalgado@usp.br](mailto:asalgado@usp.br);

<sup>2</sup> Prof. MSc, Instituto Municipal de Ensino Superior de Bebedouro, IMESB / Bebedouro - SP, [fabio.vogelaar@gmail.com](mailto:fabio.vogelaar@gmail.com);

<sup>3</sup> Profa. MSc, União dos Cursos Superiores SEB / Ribeirão Preto - SP, [juliananovi@fearp.usp.br](mailto:juliananovi@fearp.usp.br).

Recebido pelo Conselho Editorial em: 11-10-2012

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 06-05-2014

## INTRODUÇÃO

O Brasil é a sétima economia do mundo, com um PIB de US\$ 2,253 tri, segundo informações do THE WORLD BANK (2011). Seus principais produtos agropecuários são a soja, a carne, o açúcar/etanol, o café, a laranja, o milho, a mandioca e o tabaco, sendo líder mundial na produção de café, cana-de-açúcar e laranjas (PEREIRA, et al., 2010). Dentre essas várias culturas produzidas, destaca-se a agroindústria da cana-de-açúcar, onde a produção de açúcar e de etanol é um componente-chave na estratégia de desenvolvimento rural e energético de regiões específicas no Brasil (MARTINELLI et al., 2011).

Para BRAGATO et al. (2008), o setor sucroalcooleiro brasileiro é um dos mais importantes dentro do agronegócio, com expressiva geração de empregos e propulsor da indústria de peças e equipamentos de reposição para as usinas. Além disso, representa uma das atividades econômicas mais importantes, pois contribui significativamente para as exportações e balança comercial do país (ENSINAS et al., 2007). Entre os fatores que impulsionaram a expansão da produção de cana-de-açúcar no Brasil estão a ocupação de novas regiões do território brasileiro, o investimento internacional e o aumento da demanda (TORQUATO, et al., 2009).

Em relação à cana-de-açúcar, MAULE, et al. (2001) a definem como uma das melhores opções dentre as fontes de energia renováveis representando, assim, uma grande oportunidade no cenário agrícola brasileiro e um futuro promissor no cenário mundial. Ademais, recentemente, na produção de biodiesel, a cana-de-açúcar tem sido objeto de estudo como uma das possíveis soluções para questões ambientais hoje em pauta (NOVI et al., 2013).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011), na safra 2009/2010, a cana-de-açúcar representou cerca de 15% do total da área plantada no Brasil. As estatísticas da União da Indústria da Cana-de-açúcar – UNICA (2011) indicam que o processamento de cana-de-açúcar, entre a safra de 2001/2002 e 2008/2009, aumentaram em 94%, enquanto a produção de açúcar e de etanol, neste mesmo período, aumentaram, respectivamente, 62% e 138%. No entanto, nos últimos anos, o setor vem enfrentando dificuldades e desafios conjunturais para seu crescimento e consequente ganho de competitividade.

Nesse novo cenário competitivo, as usinas necessitam buscar melhorias na eficiência de seus processos internos, adequando-se a um novo modelo de produção, que leva em consideração o crescente aumento da concorrência gerada pela entrada de grupos de capital estrangeiros e pelo expansionismo (TORQUATO, et al., 2009). Portanto, o estudo da eficiência operacional em usinas de cana-de-açúcar pode contribuir para uma melhoria dos resultados obtidos no setor sucroalcooleiro. Para isso, uma técnica que permite analisar a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar é a da Análise Envoltória de Dados (AED).

De acordo com FERREIRA & GOMES (2009), os modelos AED são ferramentas cada vez mais utilizadas na tomada de decisões estratégicas em organizações empresariais e, dessa forma, efetivas quando se objetiva comparar a eficiência de diferentes unidades. COOPER, et al. (2007) definem a técnica AED como uma técnica utilizada para avaliar o desempenho de um conjunto de unidades que são denominadas *Decision Making Units* (DMUs), ou unidades tomadoras de decisão. As DMUs são as usinas de cana-de-açúcar, que são responsáveis pelo processamento de diferentes quantidades de cana-de-açúcar e capazes de produzir diferentes quantidades de açúcar e/ou de etanol.

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar safra 2008/2009.

### O processo produtivo da agroindústria canavieira

Segundo COLIN (2009), desde o século XVI a cana-de-açúcar tem sido uma das culturas mais importantes cultivadas no Brasil. O açúcar foi o produto prioritário até a década de 1970, quando o governo brasileiro introduziu o Proálcool que tinha como objetivo estimular a produção e

consumo de etanol no país. Desde então, em decorrência do aumento da demanda por etanol, medidas alternativas vem sendo estudadas (GOLDEMBERG, et al., 2008).

NEVES, et al. (2005), afirmam que apesar de possuir alguns desafios, a agroindústria brasileira possui, como principais diferenciais competitivos, o potencial de terra agricultável ainda não utilizado e a competência adquirida ao longo dos anos através da profissionalização da agroindústria no país.

Conforme HELUANE et al. (2007), o modelo de processo e a forma da operação, estão relacionados com a seleção e utilização ótima dos recursos de uma usina de cana-de-açúcar ao longo do tempo, buscando maximizar a eficiência dos equipamentos da unidade produtiva. De acordo com FERREIRA & GOMES (2009), o processo produtivo pode ser definido como uma técnica por meio da qual um ou mais produtos são obtidos a partir de determinado de insumos.

Segundo SLACK et al. (2009), o processo de produção envolve um conjunto de recursos de *inputs* usados para transformar alguma coisa ou para ser transformado em *outputs* de bens e/ou serviços. Esse modelo de transformação *input*-processo-*output* embora possa ser generalizado para todas as operações produtivas difere em relação a natureza dos *inputs* e *outputs* de cada processo.

Entretanto, para produzir uma maior quantidade de etanol por tonelada de cana plantada e por hectare, são necessárias melhorias nos fatores tecnológicos, nos processos produtivos de produção e no manejo e cultivo, além do aumento da área plantada (DIAS et al., 2011). A conversão da cana-de-açúcar em açúcar ou em etanol é composta por uma série de processos físicos e químicos que acontecem em subsistemas básicos que podem ser otimizados (MORANDIN et al., 2011).

O sistema de limpeza de cana a seco (SLCS) é uma alternativa ao sistema de lavagem de cana com água, na qual é realizada a remoção de impurezas vegetais e de impurezas minerais, onde não ocorre perda de sacarose, podendo ser aplicado para os casos de cana inteira ou picada, permitindo o regresso das impurezas às lavouras. Funciona por meio de um processo de ventilação capaz de eliminar as principais impurezas existentes junto à cana-de-açúcar colhida em campo. Essa tecnologia foi desenvolvida pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) em parceria com o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Já as tecnologias comumente empregadas em outra etapa importante do processo de produção de açúcar e de etanol, que é a extração do caldo, são o difusor e a moenda. A usina busca, nessa fase, a maior extração com a menor quantidade de impurezas possível.

O tratamento é outra etapa do processo de fermentação ou destilação do caldo, importante do ponto de vista dos equipamentos utilizados no processo produtivo que proporcionam maior eficiência operacional. Segundo a AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA (2012), o emprego do filtro para tratamento do caldo pode garantir maior eficiência operacional através da preservação de nutrientes, vitaminas, açúcares e fosfatos e sais minerais, que são necessários ao metabolismo das leveduras, bem como a diminuição de contaminantes e através da eliminação de impurezas, que diminuem a eficiência dos maquinários na produção.

### **Cana-de-açúcar: aspectos edafoclimáticos**

Diversos fatores interferem na produção e na maturação da cana-de-açúcar e são relevantes nessa pesquisa, pois interferem na produtividade de açúcar e de etanol. Para a AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO da EMBRAPA (2012) a combinação dos fatores clima, solo e variedades genéticas determinam a produtividade da cana-de-açúcar, sendo que uma produtividade mais alta pode ser conseguida através da seleção de variedades adequadas ao ambiente a ser cultivado.

A qualidade do caldo da cana-de-açúcar é intensamente influenciada pelas condições climáticas prevalentes durante os vários subperíodos do aumento do cultivo (NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT, 2012). O clima adequado para a produção da cana-de-açúcar pode ser caracterizado por uma estação quente, razoavelmente seca, ensolarada, de longa duração, com índice pluviométrico bem distribuído entre 1.100 e 1.500 mm, sobretudo com maior incidência

nos meses de crescimento. Assim, em relação às questões socioeconômicas, ambientais e agrárias, o levantamento das áreas cultivadas constitui uma das informações fundamentais aos planejamentos agrícola e de território (DELGADO et al., 2012).

O tipo de solo também é outro fator importante que influencia diretamente na produtividade da cana. No país existe uma variedade de solos utilizados no plantio da cana. Alguns tipos são o latossolo, podzólico, litólico, bruno não cálcico, cambissolo e Latossolo Roxo.

O cambissolo é um solo com desenvolvimento precário, cujas principais características são a profundidade baixa e com incidência de cascalhos alta. De acordo com a Agência de Informação EMBRAPA (2012), nos argissolos, verifica-se uma vasta diversidade nas propriedades de interesse para a fertilidade e para o uso agrícola, onde a terra roxa abrange solos de elevados potencial produtivo e importância agrícola. Segundo KER (1997), o Latossolo Roxo, denominado terra roxa, é comumente encontrado no interior do estado de São Paulo, tendo grande potencial agrícola. Inicialmente, solos cujas características estavam relacionadas à intemperização e lixiviação intensa eram conceituados como Latossolo, que são comumente aproveitados com culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento e, normalmente, estão situados em relevo plano a suave-ondulado, com declividade raramente superior a 7%, facilitando, assim, o processo de mecanização.

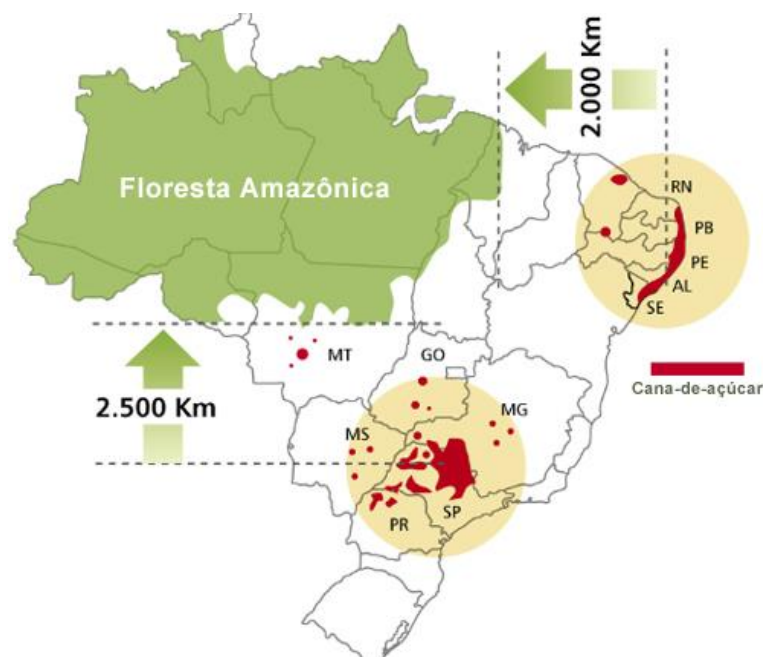
A Tabela 1 sumariza os principais tipos climáticos e de solo, por estado produtor de cana-de-açúcar.

TABELA 1. Classificação dos fatores edafoclimáticos em alguns estados do território brasileiro.  
**Classification of the edaphoclimatic factors in some states of the Brazilian territory.**

ESTADO	CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS	
	Solo	Clima
São Paulo	Predominantemente Latossolo, Podzólico e Latossolo Roxo.	Predominantemente tropical.
Minas Gerais	Predominantemente Latossolo, Podzólico e Latossolo Roxo. Cambissolo, Litólico.	Tropical
Paraná	Predominantemente Cambissolo e Litólico. Latossolo, Podzólico e Latossolo Roxo.	Predominantemente subtropical úmido.
Mato Grosso do Sul	Predominantemente areia quartzosa e hidromórfico aluvial.	Predominantemente tropical.
Goiás	Predominantemente Latossolo, Podzólico e Latossolo Roxo. Cambissolo, Litólico.	Tropical.
Mato Grosso	Predominantemente areia quartzosa e hidromórfico aluvial. Solos lixiviados sob floresta.	Tropical e equatorial úmido.
Alagoas	Predominantemente bruno não cálcico. Latossolo, Podzólico.	Predominantemente tropical. Tropical semiárido.
Pernambuco	Predominantemente Bruno não cálcico. Latossolo, Podzólico.	Predominantemente tropical semi-árido. Tropical.

Fonte: Portal Brasil (2012)

Na Figura 1, conforme dados da UNICA (2011), as áreas em vermelho concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, distribuídas de maneira heterogênea, na qual 60% está estabelecida no estado de São Paulo (NOVAES et al., 2011).



Fonte: UNICA (2011)

FIGURA 1. Concentração da produção de açúcar e álcool. **Concentration of sugar and alcohol production.**

## MATERIAL E MÉTODOS

### Análise Envoltória de Dados (AED)

Segundo FERREIRA & GOMES (2009) a Teoria da Fronteira, ou Análise Envoltória de Dados (AED) baseia-se em modelos matemáticos não paramétricos, ou seja, não utiliza inferências estatísticas e nem se apegam a medidas de tendência central. Trata-se de uma técnica que tem como objetivo avaliar o desempenho de organizações e atividades, denominadas unidades que tomam decisões ou DMUs (*Decision-Making Units*) através de medidas de eficiência técnica. DMU é o termo utilizado no método AED para referenciar unidades homogêneas que utilizam insumos semelhantes para produtos semelhantes e com autonomia para tomar decisões.

A técnica AED é sempre uma comparação em termos de eficiência entre o universo de unidades produtivas analisadas, chamadas de DMUs (ANDRADE & SANT'ANNA, 2011). A base para a teoria da eficiência do modelo AED foi concebida por CHARNES, et al. (1978) e é composta pelos conceitos de eficiência de FARRELL (1957).

A técnica AED foi empregada para avaliação da eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar. Foram consideradas como DMUs as usinas de cana-de-açúcar, que correspondem ao objeto de estudo desta pesquisa, que devem ser comparados em termos de eficiência operacional. Foram estudadas 355 usinas localizadas nos Estados de São Paulo (170), Minas Gerais (32), Paraná (28), Mato Grosso do Sul (14), Goiás (28), Mato Grosso (11), Alagoas (24), Pernambuco (23) e demais estados somados (23).

Nesta pesquisa específica, a eficiência operacional das usinas será definida como a capacidade de transformar insumos (cana-de-açúcar processada) em produtos (etanol e açúcar). Apesar das limitações de se desconsiderar (por estarem indisponíveis na base de dados utilizados) fatores, como tempo de processamento e o recurso financeiro, no cálculo da eficiência relativas entre as usinas, as três variáveis inicialmente utilizadas representam uma aproximação razoável do conceito de eficiência definida pela pesquisa.

O modelo AED CCR (Charnes, Cooper e Rhodes) maximiza o quociente entre a combinação linear dos *outputs* e a combinação linear dos *inputs*, com a restrição de que, para qualquer DMU, esse quociente não pode ser maior que 1 (SENRA et al., 2007). Esse problema de programação

fracionária, mediante alguns artifícios matemáticos, pode ser linearizado e transformado no Problema de Programação Linear (PPL), no qual  $h_0$  é a eficiência da DMU<sub>0</sub> em análise;  $x_{i0}$  e  $y_{j0}$  são os *inputs* e *outputs* da DMU<sub>0</sub>;  $v_i$  e  $u_j$  são os pesos calculados pelo modelo para os respectivos *inputs* e *outputs*.

$$\begin{aligned} \max \quad & h_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo} \\ \text{sujeito a} \quad & \sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1 \\ & \sum_{r=1}^m u_r y_{ro} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} \leq 0 \\ & k = 1, \dots, s \\ & u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j \end{aligned}$$

A partir da base de dados, avalia-se a eficiência de cada DMU e realiza-se, portanto,  $p$  otimizações, uma para cada DMU avaliada no modelo AED (COOPER, et al. 2007). Dessa forma, busca-se otimizar a seguinte equação para cada DMU:

$$\frac{\text{output}}{\text{input}}$$

Quando utilizados múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs*, maximiza-se a seguinte relação:

$$\frac{\text{output}_1 + \text{output}_2 + \dots + \text{output}_s}{\text{input}_1 + \text{input}_2 + \dots + \text{input}_p}$$

Dessa forma, para  $n$  DMUs, tem-se a seguinte programação fracionária:

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta(u, v) = & \frac{u_1 y_1 + u_2 y_2 + \dots + u_s y_s}{v_1 x_1 + v_2 x_2 + \dots + v_p x_p} \\ \text{sujeito a} \quad & \frac{u_1 y_{1j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + \dots + v_p x_{pj}} \leq 1 \\ & u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \quad (\text{inputs}) \\ & v_1, v_2, \dots, v_p \geq 0 \quad (\text{outputs}) \end{aligned}$$

Na qual, se procura maximizar o resultado da DMU<sub>0</sub>, sendo que o objetivo ótimo é um valor correspondente de  $\theta$  igual a 1, na qual  $u$  e  $v$  representam os pesos das variáveis de *input* e de *output*, respectivamente, e  $y$  e  $x$  representam os valores de cada variável de *input* e de *output*. É necessária a restrição de não negatividade para todas as variáveis do modelo.

Como se trata de uma técnica de programação linear, faz-se necessário transformar o modelo de programação fracionária em um modelo de programação linear.

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta(\mu, v) = & \mu_1 y_1 + \mu_2 y_2 + \dots + \mu_s y_s \\ \text{sujeito a} \quad & v_1 x_1 + \dots + v_m x_m = 1 \\ & \mu_1 y_{1j} + \dots + \mu_s y_{sj} \leq v_1 x_{1j} + \dots + v_p x_{pj} \\ & v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \\ & \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s \geq 0 \end{aligned}$$

## Aspectos metodológicos

O método de pesquisa está dividido em duas fases: quantitativa e qualitativa. Na primeira fase, de caráter quantitativo, para a categorização e classificação do universo de usinas estudadas em relação à eficiência operacional, é aplicada a técnica da Análise Envoltória de Dados (AED). Na segunda fase, para se analisar em profundidade os resultados encontrados na primeira fase, a abordagem é qualitativa, onde é utilizada a análise de conteúdo para descrever os resultados obtidos nos estudos de múltiplos casos em usinas e entrevistas com especialistas.

A base de dados desta pesquisa foi organizada a partir do anuário da cana-de-açúcar da safra de 2008/2009. Esta base de dados também foi utilizada por SALGADO JUNIOR et al. (2014) para mapeamento dos estados da federação que apresentam as maiores eficiências médias de suas plantas energéticas, além da mensuração da potencialidade de cada estado para novas plantas.

Na primeira fase da pesquisa, o *software* Frontier Analyst, do fabricante Banxia Software® foi utilizado para realizar a aplicação da técnica AED. O emprego do modelo CCR, com orientação a *output*, foi considerado o mais adequado. As variáveis consideradas no estudo, sua definição técnica e sua classificação em *input* e *output* encontram-se na Tabela 2.

TABELA 2. Variáveis consideradas na pesquisa. **Variables considered in the research.**

Variáveis	Classificação	Definição
Moagem (tonelada)	<i>Input</i>	Valor total, em toneladas de cana-de-açúcar, destinado à produção de açúcar e/ou etanol pela usina.
Açúcar (tonelada)	<i>Output</i>	Valor total, em toneladas de açúcar, produzido pela usina.
Etanol (m <sup>3</sup> )	<i>Output</i>	Valor total, em toneladas de etanol, produzido pela usina.

Conforme categorização utilizada pela UNICA (2011), foram construídos três estratos por ordem de tamanho para a sua análise. Os tamanhos referem-se a usinas de grande, médio e pequeno porte. As primeiras são aquelas com capacidade de moagem superior a 2,5 milhões de toneladas por safra; as segundas, são aquelas com capacidade de moagem de 1,0 a 2,5 milhões de toneladas por safra; e, as últimas, são aquelas com capacidade de moagem inferior a 1,0 milhão de tonelada por safra. De acordo com DINARDO et al. (2011), dentre os principais parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, está o teor de sacarose aparente na cana. Dessa forma, no presente estudo, a qualidade será considerada como o teor de sacarose aparente na cana.

O *software* estatístico Statistical Package for Social Sciences® (SPSS), versão 18.0. foi utilizado nos testes de hipóteses realizados para verificar se a proporção das usinas eficientes é diferente da proporção encontrada na população. Após a identificação das usinas de cana-de-açúcar consideradas eficientes e ineficientes pela técnica AED, foi iniciada a segunda fase da pesquisa.

Nessa fase qualitativa, que teve como objetivo verificar como as variáveis tamanho e localização se relacionam com as variáveis qualidade da cana-de-açúcar e eficiência operacional do processo produtivo, foram realizados os estudos de múltiplos casos, por meio de visitas técnicas e entrevistas semiestruturadas junto a gestores dos departamentos agrícola e industrial dessas usinas, buscando melhor entendimento do processo. O estudo de múltiplos casos foi realizado junto a quatro usinas de cana-de-açúcar, escolhidas em função de sua representatividade junto aos dados obtidos na fase quantitativa, que são representadas na Tabela 3.

TABELA 3. Informações do estudo de múltiplos casos. **Information of the multiple case studies.**

LOCALIZAÇÃO PORTE CLASSIFICAÇÃO				ENTREVISTADO
Usina A	SP	Grande	Eficiente	Coordenador de qualidade agrícola
Usina B	AL	Pequena	Eficiente	Supervisor de controles agrícolas
Usina C	SP	Média	Ineficiente	Gerente industrial, coordenador de gestão agrícola.
Usina D	SP	Média	Ineficiente	Gerente industrial, gerente agrícola, supervisor de qualidade agrícola

O caráter semiestruturado das entrevistas realizadas com três especialistas do setor sucroalcooleiro buscou incrementar o grau de familiaridade com o objeto da pesquisa e realizar ajustes nas variáveis abordadas ao longo dos estudos múltiplos de caso. Como já mencionado, a análise de conteúdo foi utilizada como técnica de pesquisa para avaliar os resultados dessas entrevistas.

Desse modo, para verificar os resultados obtidos na fase quantitativa, através dos estudos de múltiplos casos, foi empregada a literatura existente, que culminou no referencial teórico, juntamente às entrevistas realizadas com especialistas, possibilitando assim o desenvolvimento do modelo lógico do protocolo de pesquisa. Assim, conforme proposto por Yin (2010), foi possível desenvolver tal modelo, apresentado na Figura 2.

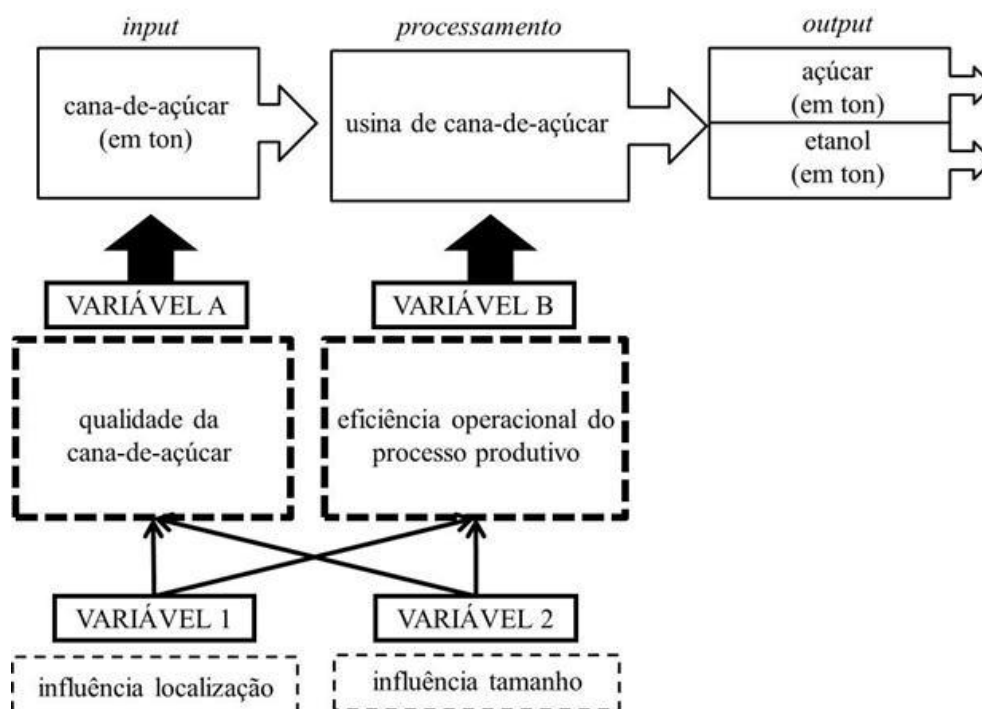


FIGURA 2. Modelo lógico do protocolo de pesquisa, adaptado de YIN (2010). **Logical model of the research protocol, adapted from YIN (2010).**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as 355 usinas de cana-de-açúcar da safra de 2008/2009, foi analisada a eficiência operacional, por meio da técnica AED, e a relação entre o montante total de cana-de-açúcar disponível para ser processada e os valores totais de produção de açúcar e etanol para cada uma das plantas energéticas. Desta forma, verificou-se que onze, das 355 usinas analisadas neste estudo obtiveram escore AED igual a 100%, ou seja, foram classificadas como eficientes. A técnica AED calcula a eficiência relativa entre um grupo de DMUs em estudo, ou seja, sempre irá existir um grupo com escore de eficiência 100%, e o restante das DMUs terão uma eficiência menor à medida que sejam proporcionalmente relativamente menos eficientes que as com escore 100%.

É importante observar que existem usinas eficientes de todos os tamanhos. De acordo com SALGADO JUNIOR, et al. (2009), a eficiência em análises AED independe do tamanho da usina, pois o importante é a proporção entre os *inputs* e *outputs* do modelo que tornam a DMU eficiente ou não.

Em relação à distribuição dos dados referentes à moagem, à produção de açúcar e de etanol das usinas de cana-de-açúcar no Brasil é possível verificar na Tabela 4 os valores médios, mínimos, máximos e de variabilidade das variáveis estudadas nesta pesquisa.



TABELA 4. Estatística descritiva. **Descriptive statistics.**

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão	Variância
MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR	355	25163,00	8004221	1583988	1258519,9	1,6E+12
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR	355	,00	499772,00	85115,08	94324,3028	8,9E+09
PRODUÇÃO DE ETANOL	355	,00	411991,00	76788,22	61763,0391	3,8E+09

No que se refere a variável localização, a Tabela 5 apresenta as frequências de usinas eficientes em relação à frequência verificada da população, por estado da federação.

TABELA 5. Frequências por localização. **Frequencies by location.**

Estado	Usinas eficientes	População total
São Paulo	8 (72,7%)	170 (47,9%)
Outros estados somados	3 (27,3%)	185 (52,1%)
Total	11 (100,00%)	355 (100,00%)

Dentre as usinas de cana-de-açúcar eficientes operando no Brasil, oito delas estão localizadas no Estado de São Paulo. Embora existam cento e sessenta e duas usinas ineficientes localizadas no estado de São Paulo, a proporção de usinas do estado de São Paulo é maior no grupo das usinas eficientes (73%), se comparado ao grupo de toda a população de usinas no Brasil (47,9%). A Tabela 6 apresenta o teste estatístico para a variável localização.

TABELA 6. Estatística teste para localização. **Statistical test for location.**

	Categoria	N	Número de Observações	Teste Proporção	Significância (1-tailed)	Significância.
LOCALIZAÇÃO	GRUPO 1	Estado de São Paulo	8	0,727	0,479	0,090
	GRUPO 2	Outros estados	3	0,273		
	TOTAL		11	1,00		

HAIR et al. (2005, p. 285) afirmam que os pesquisadores devem sempre estar cientes de dois tipos de erros associados ao teste de hipóteses. Nesta pesquisa, foi adotado um valor de  $\alpha$  de 10%, que corresponde à probabilidade do erro tipo 1, que ocorre quando os resultados da amostra levam à rejeição da hipótese nula quando ela é verdadeira.

Dessa forma, com 90% de nível de confiança, é possível afirmar que a amostra é diferente da população, ou seja, a proporção verificada para as usinas eficientes é diferente da proporção verificada para a população total de usinas para a variável localização. A hipótese nula ( $H_0$ ), que afirma que não existe diferença na proporção da amostra em relação à proporção verificada na população, deve ser, portanto, rejeitada. Isso significa dizer que para o grupo das usinas eficientes existe uma maior concentração de usinas localizadas no Estado de São Paulo, em relação à concentração na população.

Outra variável relevante para o estudo é o tamanho das usinas de cana-de-açúcar. Para testar a diferença de proporções em relação a essa variável, utilizou-se do teste Qui-quadrado. A Tabela 7 apresenta as frequências para os dois grupos de usinas.

TABELA 7. Frequências por tamanho. **Frequencies by size.**

	Usinas eficientes	População total
USINA GRANDE	5 (45,5%)	60 (16,9%)
USINA MÉDIA	2 (18,2%)	163 (45,9%)
USINA PEQUENA	4 (36,3%)	132 (37,2%)
TOTAL	11 (100.0%)	355 (100.0%)

A Tabela 8 testa a hipótese nula ( $H_0$ ) de que as frequências encontradas na amostra, grupo das usinas eficientes, são iguais às frequências esperadas a partir das proporções verificadas no grupo da população total, que compreende o grupo de todas as usinas estudadas.

TABELA 8. Teste Qui-quadrado para o tamanho das usinas. **Chi-square test for the mills size.**

	<i>Observado N</i>	<i>Esperado N</i>	<i>Residual</i>
USINA GRANDE	5	1,9	3,1
USINA MÉDIA	2	5,1	-3,1
USINA PEQUENA	4	4,1	-0,1
TOTAL	11		

A Tabela 9 apresenta o teste estatístico para a variável tamanho.

TABELA 9. Estatística teste para tamanho das usinas. **Statistical test for mills size.**

	TAMANHO
<i>Qui-quadrado</i>	7,149
<i>DF</i>	2
<i>Nível de Significância.</i>	0,028

Desta forma, pode-se afirmar que, em relação à variável tamanho a proporção verificada para as usinas eficientes é diferente da proporção verificada para a população total de usinas. Sendo assim, tanto a variável tamanho como a variável localização, exercem alguma influência na eficiência operacional das usinas.

No intuito de analisar em profundidade os resultados encontrados a partir das análises estatísticas, foram realizados estudos de múltiplos casos junto a diferentes usinas de cana-de-açúcar.

### Estudo de caso usina A

A usina A é de grande porte e está localizada no estado de São Paulo. Aproximadamente 50% da cana-de-açúcar moída nesta usina é proveniente de terras próprias, o remanescente é proveniente de terras de fornecedores e arrendamentos. Do total de cana-de-açúcar colhida, a porcentagem que é colhida de forma mecânica é igual a 95%.

Atualmente a usina queima 5% do total de cana-de-açúcar, cuja colheita é realizada de forma manual. As variedades genéticas de cana-de-açúcar são fornecidas por dois órgãos de pesquisa do setor sucroalcooleiro, no entanto, são variedades similares voltadas para as condições edafoclimáticas da região na qual a usina está localizada.

O entrevistado desta usina foi enfático ao dizer que a usina é capaz de produzir uma cana-de-açúcar com um excelente teor de sacarose em virtude das condições climáticas da região e do solo. Tais fatores, aliados ao manejo adequado da cultura e do uso da variedade certa, possibilitam bons resultados no que diz respeito à qualidade da cana. A própria usina é responsável pela adubação do solo, sendo que, após uma análise prévia, os insumos são aplicados de acordo as necessidades.

De acordo com o entrevistado, as etapas do processo produtivo são comuns para todas as usinas. Existe, no entanto, uma diferenciação em relação às tecnologias utilizadas para a realização de cada etapa. Ademais as tecnologias estão ao acesso de todos.

Na etapa de extração do caldo, a usina utiliza a moenda, que realiza a extração do caldo por meio do esmagamento da cana. No entanto, são utilizados muitos equipamentos que proporcionam um ganho de eficiência dentro do processo produtivo, como é o caso da limpeza a seco e da utilização do filtro para separação de impurezas na fase de tratamento do caldo. Esse filtro não é obrigatório, mas a sua utilização permite uma redução de impurezas e ganho em produtividade.

A decisão relativa ao percentual a ser produzido de açúcar e etanol é tomada levando em consideração a mercadoria que apresenta maior lucratividade no momento. Leva-se em consideração, portanto, os preços dos produtos no mercado internacional, uma vez que trata-se de uma *commodity*.

A usina A possui economia de escala a partir da compra de insumos para a produção, em virtude da quantidade. De acordo com o entrevistado, existe hoje uma tendência de que as usinas menores se juntem para a realização da compra compartilhada de insumos, sobretudo no estado de São Paulo, no qual a concentração de usinas de cana-de-açúcar é maior.

O entrevistado afirmou ainda que o clima tropical da região é favorável ao cultivo da cana-de-açúcar, bem como as condições edáficas, que dizem respeito às condições do solo. Existe uma predominância de solos do tipo latossolo roxo, que tende a proporcionar uma maior produtividade de cana por hectare e uma maior quantidade de sacarose por tonelada de cana. No entanto, dentro do estado de São Paulo, nem todos os solos possuem o mesmo nível de fertilidade. A localização é favorável também do ponto de vista da proximidade com o mercado consumidor e da facilidade de distribuição, mas é favorável, sobretudo, em função do clima e do solo.

### **Estudo de caso usina B**

A usina B é considerada de pequeno porte e está localizada no estado de Alagoas. Ela possui um grande percentual de terras próprias, corresponde a 82,5% do total, na qual a colheita é realizada 100% de forma manual. Toda a cana é queimada, tanto aquelas próprias, como aquelas de terceiros ou arrendadas. As principais variedades genéticas cultivadas são RB 867515, RB 92579, SP 791011, VAT 90212, RB 93509, SP 813250. A própria usina é responsável pela tarefa de adubação das terras, sendo que ela é realizada de acordo com as análises realizadas pelo setor agrícola.

No processo produtivo, não é realizada a limpeza da cana-de-açúcar, utiliza-se a moenda na fase de extração do caldo e decantadores convencionais são utilizados no tratamento do caldo. Ainda, na produção do etanol, tem-se a fermentação contínua e destilação contínua. Um detalhe é que nesta usina produz-se, exclusivamente, etanol.

Os solos que constituem o estande da usina são principalmente latossolos vermelho-amarelos e argilosos, que apresentam boa qualidade física e alta capacidade de manejo de sua fertilidade. O clima litorâneo úmido é favorável ao cultivo da cana-de-açúcar, sobretudo, em virtude da umidade e da forte exposição ao sol.

O estado de Alagoas é aquele que apresenta o maior número de empresas do setor sucroenergético do nordeste, com um total de 24 unidades, por isso existe uma infraestrutura instalada que favorece o crescimento e desenvolvimento do setor.

### **Estudo de caso usina C**

A usina C é considerada de pequeno porte e está localizada no estado de São Paulo. Pela técnica AED ela é considerada uma usina ineficiente. A usina não possui terras próprias e o percentual de terras concedidas à usina do tipo fornecimento é igual a 50%, a outra metade é arrendada. A usina possui uma extensão de terra com inclinação elevada, cuja colheita tem de ser manual, 60% do total de cana-de-açúcar é colhido de forma mecanizada. São utilizadas nove frentes de colheita, sendo que duas realizam a colheita manual.

Na colheita mecanizada, não existe a necessidade de queimada, o equipamento é capaz de separar a palha do bagaço de cana-de-açúcar. No entanto, parte da palha permanece no trasbordo e vai para a usina. A palha que é eliminada é deixada no campo para impedir que cresçam outras culturas no lugar da cana-de-açúcar. No entanto, ela poderia ser utilizada para a cogeração de energia.

São utilizadas muitas variedades genéticas de cana-de-açúcar, que dependem do ambiente de produção, ou seja, das condições edafoclimáticas e de quando ela será colhida. A adubação é frequentemente realizada, no entanto, esta é feita de acordo com especificações que são transmitidas.

A usina C possui duas linhas de produção. A primeira, mais nova, possui uma capacidade produtiva de 8000 toneladas por dia e equipamentos de alta tecnologia. A limpeza da cana-de-açúcar nessa linha de produção é realizada pelo SLCS, ou seja, limpeza a seco. A segunda linha de produção é mais antiga, com capacidade de 5000 ton/dia, na qual a limpeza, ou lavagem, é realizada com água e tem como aspecto negativo a perda de parte da sacarose.

De acordo com o entrevistado, o acesso às tecnologias também independe da localização, já que usinas localizadas em diferentes estados do país conseguem adquirir equipamentos de alta tecnologia de diversos fornecedores que muitas vezes são apresentadas na diversas feiras do setor.

A usina produz açúcar, etanol e é autossuficiente em energia. A decisão referente à produção de açúcar ou de etanol depende da demanda e da atratividade dos produtos no mercado. Na compra de insumos, existem parcerias com outras usinas da região com o intuito de reduzir custos. No entanto, a quantidade de insumo utilizado não eleva o potencial produtivo do solo.

#### **Estudo de caso usina D**

A usina D é considerada de médio porte e está localizada no estado de São Paulo. Pela técnica AED ela é considerada uma usina ineficiente. Do total de 58000 hectares de terra, 1000 hectares são de propriedade da usina, 35000 hectares são arrendados e 22000 são do tipo fornecimento.

Nas entrevistas verificou-se que as terras próprias tendem a apresentar um teor menor de sacarose porque nelas são plantadas variedades genéticas com colheita precoce ou tardia, visando melhorar a linearidade no fornecimento de cana ao longo da safra. Isso pode ser um problema para o modelo AED apresentado uma vez que o excesso de cana tardia e precoce pode reduzir o teor médio de ATR ao longo da safra. Nesta usina 97% da colheita é realizada de forma mecanizada e a queimada é realizada apenas para a colheita manual, ou seja, 3% do total.

As variedades genéticas utilizadas são desenvolvidas pelo CTC e são pré-determinadas para cada ambiente de produção, dependendo também da época da colheita. A adubação é realizada pela própria usina de acordo com as necessidades de cada solo, a partir de análises das necessidades. Observou-se ainda que, apesar do acesso à tecnologia de processos ser independente da localização, o entrevistado acredita que o estado de São Paulo possui a vantagem de uma melhor mão-de-obra.

Na usina D utiliza-se a moenda para a extração do caldo, embora a tecnologia tenha capacidade de extrair entre 95% e 97%, abaixo do valor aproximado de 98% do difusor, acredita-se que a qualidade obtida a partir da moenda é superior. Não é utilizada, no entanto, limpeza da cana-de-açúcar. Como a maior parte da cana na usina é picada, a limpeza com água não é interessante, por isso, pretende-se, no futuro, adquirir o SLCS. No momento, o foco da usina ainda é aumentar a quantidade de cana-de-açúcar processada. Pretende-se, portanto, aumentar o tamanho da usina para posteriormente investir em equipamentos de aumento da produtividade. A fermentação é realizada na usina pelo método de batelada. No entanto, utiliza-se do filtro para aumentar a eficiência no tratamento do caldo. A compra de insumos para a produção acontece junto de outros 11 grupos.

A usina D faz uso de sua capacidade máxima instalada tanto na produção de açúcar como na produção de etanol, produzindo-os em uma proporção de 58% de açúcar e 42% de etanol. A safra atualmente se estende de março a dezembro, por isso existe uma dificuldade em aumentar a

quantidade de moagem sem investimentos em equipamentos. Por exemplo, a usina necessita de um metro quadrado de área para filtração, por tonelada de cana, no entanto, a usina hoje não possui esse espaço, o que acarreta em perda de rendimento no valor de 5%. Financeiramente costuma ser mais interessante aumentar a quantidade de cana-de-açúcar processada, no entanto, ainda assim acredita-se ser importante o investimento no aumento da produtividade.

A Tabela 10 apresenta os principais resultados encontrados a partir do estudo de múltiplos casos, no que diz respeito às características da cana-de-açúcar e à eficiência operacional do processo produtivo, para as quatro usinas estudadas.

**TABELA 10. Principais resultados encontrados nos estudos de múltiplos casos. Main results found in the studies of multiple cases.**

Denominação	Localização	Porte	Classificação	Variável A - edofoclimáticas	Variável B - eficiência operacional do processo produtivo
Usina A	SP	Grande	Eficiente	Clima tropical; Latossolo Roxo.	Colheita predominantemente mecanizada, utilização de moenda, SLCS, utilização de fermentação contínua, peneira molecular para recuperação do anidro e uso de filtro no tratamento do caldo.
Usina B	AL	Pequena	Eficiente	Clima litorâneo úmido; Latossolos Vermelho-Amarelos e Argilosos.	Colheita manual, utilização moenda, fermentação contínua, uso de filtros para tratamento do caldo e evaporadores.
Usina C	SP	Média	Ineficiente	Clima tropical; Latossolo ácrico.	Colheita predominante mecanizada, utilização de moenda, limpeza da cana predominantemente com água, não utiliza demais equipamentos na produção.
Usina D	SP	Média	Ineficiente	Clima tropical; Latossolo ácrico.	Colheita predominante mecanizada, utilização de moenda, não é realizada a limpeza da cana, é utilizado filtro para tratamento do caldo, fermentação por batelada.

A partir da literatura, das entrevistas realizadas com especialistas e sobretudo a partir do estudo de múltiplos casos nas usinas A, C e D, foi possível verificar que, em virtude dos custos fixos elevados, inerentes às instalações de uma nova planta energética, frequentemente os gestores procuram utilizar a máxima capacidade produtiva instalada, pois um aumento do volume processado pela usina significa um ganho financeiro elevado. Desta forma, foram identificados equipamentos ou tecnologias que podem proporcionar uma maior eficiência operacional. Essa informação ressalva a importância da realização de um estudo quali-quantitativo que envolva estudo de caso. Ele torna-se necessário, uma vez que algumas variáveis, que não estão disponíveis na formulação da modelagem da técnica AED, só são possíveis de serem encontradas por meio do estudo de caso.

Esse resultado corrobora a afirmação de ROMÃO JÚNIOR (2009) de que alguns equipamentos representam investimentos altos, possuem um custo de implementação elevado e, por isso, estão relacionados ao porte e às características operacionais das usinas. Os principais equipamentos, ou tecnologias, que proporcionam ganhos de eficiências, verificados a partir das entrevistas, foram o sistema de limpeza de cana a seco (SLCS) e o filtro para tratamento do caldo.

Neste aspecto, a escala foi verificada como um aspecto relevante no que diz respeito à eficiência operacional do processo produtivo, na medida em que maior escala pode viabilizar um investimento em equipamentos que proporcionam melhor aproveitamento da tonelada de cana-de-

açúcar que entra na esteira da linha de produção. No entanto, isso não é necessariamente uma imposição, uma vez que existem usinas pequenas que podem utilizar essa tecnologia, pois ela está disponível a todos.

A partir das entrevistas com especialistas e, posteriormente, no estudo de múltiplos casos realizados nas usinas, verificou-se que o solo e o clima, são aspectos importantes e determinantes, que impactam na qualidade da cana-de-açúcar e no teor de sacarose encontrado na mesma. CESAR et al. (1987) afirmam que existem vários fatores que interferem na produção e maturação da cana-de-açúcar, como a interação edafoclimática, o manejo da cultura e a variedade da cana-de-açúcar escolhida para a plantação. O manejo da cultura e a variedade genética, no entanto, são aspectos que visam a aproveitar ao máximo o potencial agrícola do ambiente de produção, ou seja, procurar possibilitar que o solo faça uso de todo o seu potencial produtivo.

Nas usinas A e B foram encontrados indícios de que os fatores edafoclimáticos são relevantes, na medida em que as duas usinas, classificadas como eficientes pela técnica AED, estão localizadas em regiões cujos ambientes de produção são favoráveis. De acordo com SMEETS et al. (2008), TORQUATO et al. (2009), e MARTINELLI et al. (2011), existem evidências de que o estado de São Paulo está localizado em uma região cujos fatores edafoclimáticos são os mais favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar.

A Tabela 11 representa a parte final do relatório do estudo de caso de YIN (2010), na qual é realizada a triangulação de várias evidências consultadas no presente estudo que convergem para os resultados verificados. São apresentados os autores que abordaram cada um dos fatores, relacionando-os com a eficiência em usinas, em seguida, quais as usinas que, a partir do estudo de múltiplos casos, possibilitaram a análise da influência de cada fator na eficiência operacional.

TABELA 11. Triangulação dos resultados encontrados. **Triangulation of the results found.**

VARIÁVEIS		FATORES	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	ESTUDO DE CASO	ESPECIALISTAS
Eficiência operacional	Qualidade da cana-de-açúcar	Solo	SMEETS et al. (2008); CESAR et al. (1987); LEPSCH (1987); MAULE, MAZZA, MARTHA-JUNIOR (2001); STAUT (2012); Agência de Informação Embrapa (2012).	Usinas A, B	Proprietário de organização de insumos para plantio de cana-de-açúcar.
		Clima	SMEETS et al. (2008); CESAR et al. (1987); MAULE, MAZZA, MARTHA-JUNIOR (2001); Netafim's Agriculture Department (2012).	Usinas A, B	Proprietário de organização de insumos para plantio de cana-de-açúcar.
	Processo produtivo	Limpeza a seco da cana-de-açúcar	SERMATEC (2012); EMPRAI (2012); JACARÉ (2012); ROMÃO JUNIOR (2009).	Usinas A, C, D	Prof. Dr. UNESP Jaboticabal.
		Filtro para tratamento do caldo	Agência de Informação EMBRAPA (2012); REDETEC (2012).	Usinas A, C, D	Prof. Dr. UNESP Jaboticabal.

## CONCLUSÕES

Com o estudo de caso somado aos pressupostos teóricos, é possível concluir de que, no grupo das usinas eficientes, existe a concentração de usinas localizadas no estado de São Paulo uma vez que oito das onze consideradas eficientes localizam-se neste estado da federação. No que diz respeito à variável porte, existe uma maior concentração de usinas cujo tamanho é classificado

como grande, uma vez que 45,5% das eficientes são de grande porte contra 16,9% do total de usinas do estudo.

Para justificar os resultados relacionados a variável localização, os estudos teóricos sugerem que, no estado de São Paulo os fatores edafoclimáticos predominantes, contribuem para uma cana-de-açúcar de maior teor de sacarose, fato que, para o modelo de AED proposto, colabora significativamente para o aumento de seu escore AED. Sugere-se portanto que para as usinas localizadas em São Paulo, independentemente da tecnologia utilizada são maiores as chances dela conseguir obter uma maior produção de açúcar e etanol com o mesmo volume de cana-de-açúcar. Por outro lado, apesar de predominarem os fatores edafoclimáticos em São Paulo, o que justifica a maior proporção de usinas eficientes neste estado, estes fatores, em menor proporção, podem ser encontrados em outros estado do Brasil.

Sobre a variável porte, o estudo aponta para que as usinas grandes tenham maiores motivações para investir em tecnologias que proporcionem condições para um processo produtivo mais eficiente. Duas tecnologias que exercem grande influência na eficiência operacional são o SLCS e o filtro para tratamento do caldo. Ambas são consideradas tecnologias que podem proporcionar uma maior eficiência operacional na planta energética e tendem a ser mais frequentemente utilizadas em usinas que operam em maior escala, uma vez que estas ficam impossibilitadas de investir em aumento de capacidade fabril, por já estarem no limite de sua capacidade produtiva. Ademais pelo próprio porte aumenta-se a probabilidade de existir capital financeiro para o investimento nestas tecnologias. A Figura 3 apresenta o modelo lógico dos resultados que levaram às conclusões da pesquisa.

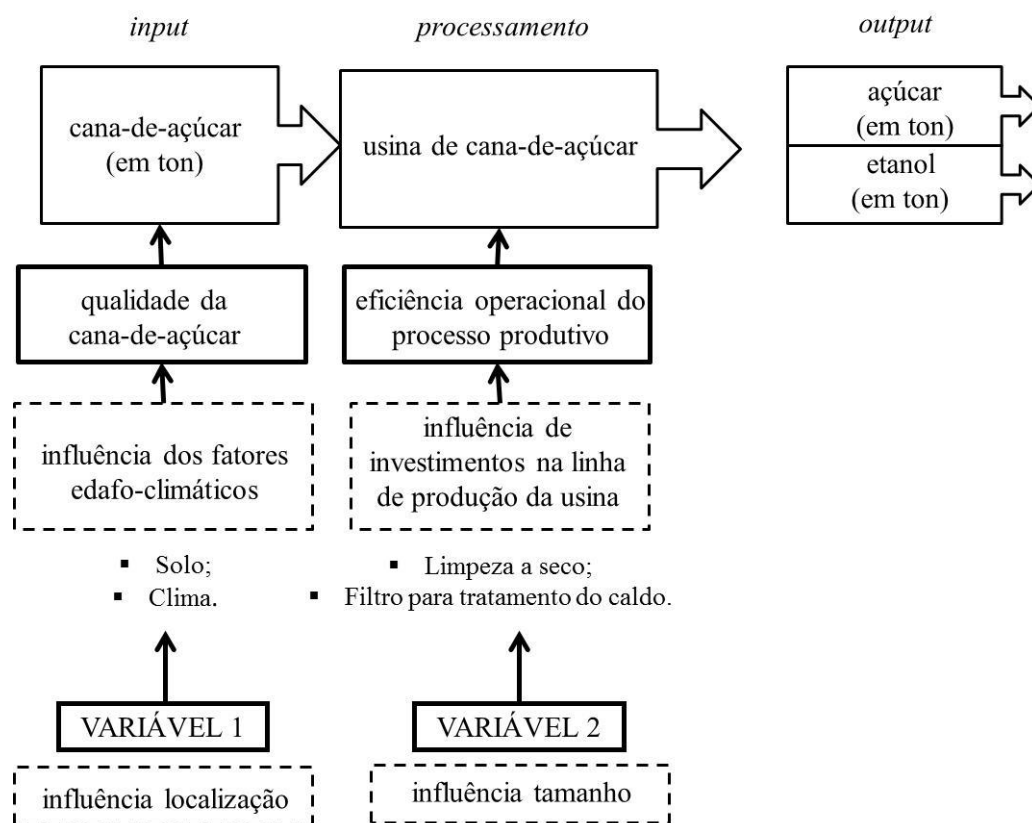


FIGURA 3. Modelo lógico dos resultados verificados. **Logical Model of the results observed.**

Os resultados sugerem, portanto, que, para otimizar a eficiência operacional em usinas de cana-de-açúcar, é necessário que usinas sejam instaladas em locais de clima e solo favoráveis, para a extração de uma cana-de-açúcar com maior teor de sacarose, e investimentos em equipamentos e tecnologias, como o SLCS e o filtro para tratamento do caldo, para um processo produtivo mais eficiente.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada permitiu a verificação de alguns aspectos relevantes em uma usina de cana-de-açúcar no Brasil. Dessa forma, durante a realização da pesquisa, algumas ideias surgiram, que valem uma investigação mais específica sobre o assunto. Recomenda-se, portanto, um estudo com variáveis complementares àquelas analisadas na fase do estudo quantitativo, possibilitando a aplicação do modelo AED com um número maior de variáveis como custos operacionais e custos de produção da cana-de-açúcar. Ademais, seria interessante uma análise temporal confrontando os resultados encontrados em 2008/2009 com os de outras safras.

Ainda, no que diz respeito às queimadas, estas podem influenciar os resultados na medida em que possibilitam a desidratação e eliminação da palha da cana-de-açúcar, o que pode tornar cada tonelada de cana queimada mais produtiva que aquela não queimada. Seria interessante, portanto, a realização de um estudo da eficiência operacional em usinas, sob a influência da queimada da cana-de-açúcar.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA. Disponível em:

<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 22 ago. 2012.

ANDRADE, G. N.; SANT'ANNA, A. P. Análise da evolução da eficiência de empresas de transmissão de energia elétrica. *Relatórios de pesquisa em engenharia de produção*, v.1, 2011.

BRAGATO, I. R.; SIQUEIRA, E. S.; GRAZIANO, G.; SPERS, E. E. Produção de açúcar e álcool vs. responsabilidade social corporativa: as ações desenvolvidas pelas usinas de cana-de-açúcar frente às externalidades negativas. *Revista Gestão & Produção*, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 89-100, 2008.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P. de; BISSOLI, B. M. A.; SILVA, F. C. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. *STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos*, Piracicaba, v. 6, p. 32-38, 1987.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 2, n. 3, p. 429-444, 1978.

COLIN, E. C. Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. *European Journal of Operational Research*, v. 199, n. 1, p. 232-235, 2009.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. *Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. New York: Springer Science, 2007.

DELGADO, R. C.; SEDIYAMA, G. C. COSTA, M. H.; SOARES, V. P.; ANDRADE, R. G. Classificação espectral de área plantada com a cultura da cana-de-açúcar por meio da árvore de decisão. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 32, n. 2, 2012.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROCHA, G. J. M.; PRADELLA, J. G. C.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production? *Bioresource Technology*, Kidlington, v. 102, p. 8964-8971, 2011.

DINARDO, V.; SILVA NETO, H. F.; TASSO JUNIOR, L. C.; CAMILOTTI, F.; MARQUES, M. O. Avaliação da pol em cana-de-açúcar com ciclo de maturação em início de safra. *Ciência & Tecnologia*, Piracicaba, v. 3, 2011.



EMPRAL. Disponível em: <<http://www.empral.com.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2012

ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, Kidlington, v. 48, p. 2978-2987, 2007.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, London, v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957.

FERREIRA, C. M. de C.; GOMES, A. P. *Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações*. Viçosa: Editora UFV, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, p. 20 Surrey, 86-2097, 2008.

HAIR JR., J. F.; BABIN, B.; MONEY, A. H.; SAMOUEL, L. P. *Fundamentos de método de pesquisa em administração*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HELUANE, H.; COLOMBO, M.; HERNÁNDEZ, M. R.; GRAELLS, M.; PUIGJANER, L. Enhancing sugar cane process performance through optimal production scheduling. *Chemical Engineering and Processing*, v. 46, p. 198-209, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 30 nov. 2011.

JACARÉ. Disponível em: <<http://www.jacare.ind.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma Revista. *Genomos*, v. 5, Belo Horizonte, n. 1, p. 17-40, 1997.

LEPSCH, I. F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: POTAFOS, 1977. p. 83-98.

MARTINELLI, L. A.; GARRETT, R.; FERRAZ, S.; NAYLOR, R. Sugar and ethanol production as a rural development strategy in Brazil: evidence from the state of Sao Paulo. *Agricultural Systems*, Kidlington, V. 104, p. 419-428, 2011.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JUNIOR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 58, p. 295-301, 2001.

MORANDIN, M.; TOFFOLO, A.; LAZZARETTO, A.; MARÉCHAL, F.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A. Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system. *Energy*, Kidlington, v. 36, p. 3675-3690, 2011.

NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT. Disponível em: <[http://www.sugarcrocrops.com/p/soil\\_requirement/](http://www.sugarcrocrops.com/p/soil_requirement/)>. Acesso em: 18 ago. 2012.

NEVES, M. F.; ZYLBERSTAJN, D.; NEVES, E. M. *Agronegócio no Brasil*. São Paulo: Saraiva, 2005.

NOVAES, M. R. de; RUDORFF, B.; ALMEIDA, A. M. de; AGUIAR, D. A. de. Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar: perspectivas futuras ao cumprimento do protocolo agroambiental. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 31, n. 3, 2011.

NOVI, J. C.; OLIVEIRA, S. V. W. B. ; SALGADO JUNIOR, A.P. ; BONACIM, C. A. G.; OLIVEIRA, M. M. B. de. Avaliação legal, ambiental e econômica da implantação de sistema próprio de tratamento de resíduos de serviços de saúde para geração de energia em hospital-escola do estado de São Paulo. *Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPR)*, v. 27, p. 193-209, 2013.

PEREIRA, M. W. G.; TEIXEIRA, E. C.; RASZAP-SKORBIANSKY, S. Impacts of the Doha Round on Brazilian, Chinese and Indian agribusiness. *China Economic Review*, London, v. 21, p. 256-271, 2010.

PORTAL BRASIL. Disponível em: <[http://www.portalbrasil.net/brasil\\_solo.htm/](http://www.portalbrasil.net/brasil_solo.htm/)>. Acesso em: 18 ago. 2012.

REDETEC- Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.redetec.org.br/inventabrasil/vacpres.htm/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

ROMÃO JUNIOR, R. A. 2009. 165 f. *Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira*. 2009. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

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 e Agroindustriais*, Lavras, v.11, p.494 - 513, 2009.

SALGADO JUNIOR, A. P.; CARLUCCI, F. V.; BONACIM, C. A. G.; NOVI, J. C.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C. Investment potential for new sugarcane plants in Brazil based on assessment of operational efficiency. *The International Food and Agribusiness Management Review (Online)*, v. 17, p. 41-64, 2014.

SENRA, L. F. A. C.; NANJI, L. C.; MELLO, J. C. C. B. S.; MEZA, L. A. Estudo sobre método de seleção de variáveis em DEA. *Pesquisa Operacional*, v. 27, Rio de Janeiro, n. 2, p. 191-207, 2007.

SERMATEC. Disponível em: <<http://www.sermatec.com.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas, 2009.

SMEETS, E.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; WALTER, A.; DOLZAN, W. T. The sustainability of Brazilian ethanol: an assessment of the possibilities of certified production. *Biomass and Bioenergy*, Kidlington, v. 32, p. 781-813, 2008.

STAUT, L. A. *Condições dos solos para o cultivo da cana-de-açúcar*. Disponível em: <<http://www.cpao.embrapa.br/portal/artigos/artigos/artigo18.html/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

THE WORLD BANK. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/data-catalog/GDP-ranking-table/>>. Acesso em: 14 ago. 2011.

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

ÚNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em 30 nov. 2011.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.