UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE
RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO DE ORGANIZAÇÕES

FÁBIO VOGELAAR CARLUCCI

**Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das
variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar
na produção de açúcar e etanol no Brasil.**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Pereira Salgado Junior

RIBEIRÃO PRETO
2012

Prof. Dr. João Grandino Rodas
Reitor da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Sigismundo Bialoskorski Neto
Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto

Prof. Dr. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira
Chefe do Departamento de Administração

FÁBIO VOGELAAR CARLUCCI

Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Pereira Salgado Junior

Versão Corrigida
(versão original disponível na FEA-RP)

RIBEIRÃO PRETO

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Carlucci, Fábio Vogelaar

Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização e eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil. Ribeirão Preto, 2012.

103 f.: il.; 30 cm

Dissertação de Mestrado, apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

Orientador: Salgado Junior, Alexandre Pereira

1. Usinas de Cana-de-Açúcar. 2. Eficiência Operacional. 3. Análise Envoltória de Dados (DEA).

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Fábio Vogelaar Carlucci

Título: Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Aprovada em: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof.(a) Dr.(a) _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof.(a) Dr.(a) _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof.(a) Dr.(a) _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo amor e confiança incondicional.
À minha irmã, pelo apoio e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Pereira Salgado Junior, um grande amigo, que me proporcionou um grande aprendizado não apenas em questões acadêmicas e profissionais, mas, sobretudo, relativo à convicção na tomada de decisão com base nos meus valores.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa.

A todos os professores do Departamento de Administração da FEA-RP/USP.

À Érika, Vania e Matheus, funcionários do Serviço de Pós-Graduação da FEA-RP/USP, agradeço pela atenção e dedicação em diversos momentos ao longo da realização deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação da FEA-RP/USP, que me proporcionaram conhecimentos, ensinamentos e que certamente contribuíram para o nível de excelência do Programa.

Às quatro organizações envolvidas na pesquisa, pela disponibilidade, dedicação e colaboração. No Brasil existe ainda certo ceticismo por parte de muitas empresas em relação à pesquisa, dessa forma, eu parablenizo e agradeço imensamente pela oportunidade concedida por essas organizações que possibilitaram não apenas as entrevistas, mas visitas técnicas completas em suas instalações, o que enriqueceu sobremaneira a qualidade do estudo.

Ao meu pai, Wagner Carlucci, que tenho como herói e exemplo a ser seguido.

À minha mãe, Patricia Rabello Vogelaar Carlucci, pelo amor incondicional, direcionamentos, conversas e, sobretudo, pela atenção e dedicação com a qual se propõe a contribuir para o meu sucesso e felicidade.

À minha irmã, Mariana Vogelaar Carlucci, pelas viagens, parceria e companheirismo.

A toda a minha família, pelo amor e carinho.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Uma enorme gratidão à Universidade de São Paulo.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

RESUMO

CARLUCCI, F. V. 2012. 103 f. **Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.

Este estudo tem por objetivo analisar o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil. Para isso, foram utilizados os dados referentes à moagem e produção de açúcar e de etanol das usinas brasileiras listadas no anuário da cana-de-açúcar na safra 2008/2009. Desta forma, realizou-se um estudo de eficiência operacional, por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), na qual foi possível identificar as usinas mais eficientes dentre um universo de 355 usinas e classificá-las por tamanho, localização e eficiência operacional. A análise quantitativa sugere que existe uma 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. Ademais, foi feita uma entrevista com especialistas do setor sucroalcooleiro. Dessa forma, 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 um 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. O presente estudo, portanto, fornece subsídios para que gestores destas empresas possam alcançar maior eficiência operacional, bem como fornecer suporte a decisões de investimento nesse setor, uma vez que a escolha da localização e da tecnologia pode influenciar na eficiência.

Palavras-chave: Usinas de Cana-de-Açúcar; Eficiência Operacional; Análise Envoltória de Dados (DEA).

ABSTRACT

CARLUCCI, F. V. 2012. 103 f. **Data Envelopment Analysis (DEA) application for the evaluation on the impact of size and location over the operational efficiency of sugarcane mills in the production of sugar and ethanol in Brazil.** Master Degree Thesis – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.

This research aims to analyze the impact of the variables size and location over the operational efficiency of sugarcane mills producing sugar and ethanol in Brazil. Thus, data concerning total milling and total production of sugar and ethanol plants, was collected regarding Brazilian sugarcane mills listed in the 2008/2009 sugarcane yearbook. A ranking of operational efficiency 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. This study, therefore, provides subsidies so that managers may obtain higher levels of operational efficiency, as well as support decisions of investments in the sugarcane industry, as the decisions concerning location and size may influence the sugarcane mill efficiency.

Key-words: Sugarcane Mills; Operational Efficiency; Data Envelopment Analysis (DEA).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCC	Banker-Charnes-Cooper
CCR	Charnes-Cooper-Rhodes
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decison Making Unit</i>
PPL	Problema de programação linear
SLCS	Sistema de lavagem de cana a seco
SPSS	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Marcos teóricos da pesquisa.....	21
Quadro 2 - Comparativo entre moenda e difusor.....	36
Quadro 3 - Critérios para classificação da capacidade dos solos para cultivo.....	41
Quadro 4 - Recomendações de manejo de variedades CTC.....	43
Quadro 5 - Definições de eficiência.....	47
Quadro 6 - Classificação das variáveis.....	60
Quadro 7 - Informações do estudo de múltiplos casos.....	66
Quadro 8 - Variáveis do referencial teórico relacionadas à eficiência operacional.....	66
Quadro 9 - Informações usina A.....	80
Quadro 10 - Informações usina B.....	82
Quadro 11 - Informações usina C.....	83
Quadro 12 - Informações usina D.....	84
Quadro 13 - Resultados encontrados no estudo de múltiplos casos.....	86
Quadro 14 - Triangulação dos resultados encontrados.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de usinas por tamanho.....	61
Tabela 2 - Classificação de usinas por estado da federação.....	62
Tabela 3 - Estatística descritiva.....	70
Tabela 4 - Usinas eficientes.....	76
Tabela 5 - Frequências por localização.....	77
Tabela 6 - Frequências por tamanho.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indústria de cana-de-açúcar no Brasil.....	22
Figura 2 - Processamento total de cana-de-açúcar no Brasil.....	23
Figura 3 - Produção total de etanol no Brasil.....	23
Figura 4 - Produção total de açúcar no Brasil.....	24
Figura 5 - Quantidade produzida lavoura temporária no Brasil.....	25
Figura 6 - Processamento de cana-de-açúcar por unidade da federação.....	26
Figura 7 - Produção de açúcar por unidade da federação.....	27
Figura 8 - Produção de etanol por unidade da federação.....	28
Figura 9 - Exportação brasileira de açúcar.....	29
Figura 10 - Exportação brasileira de etanol.....	30
Figura 11 - Fluxo básico do processo de produção de açúcar e de etanol.....	33
Figura 12 - Fluxo detalhado do processo de produção de açúcar e de etanol.....	35
Figura 13 - Mapa de solos do território brasileiro.....	39
Figura 14 - Mapa de solos do tipo latossolo roxo no território brasileiro.....	41
Figura 15 - Mapa de clima do território brasileiro.....	42
Figura 16 - Fronteira eficiente de produção.....	48
Figura 17 - Economia de escala.....	49
Figura 18 - Deseconomia de escala.....	49
Figura 19 - Relacionamento entre dois inputs e um output.....	50
Figura 20 - Elementos da DMU.....	51
Figura 21 - Gráfico do modelo DEA CCR.....	52
Figura 22 - Gráfico do modelo DEA BCC.....	54
Figura 23 - Comparativo entre modelos DEA CCR e BCC.....	56
Figura 24 - Modelo lógico da fase quantitativa da pesquisa.....	59
Figura 25 - Modelo lógico do protocolo de pesquisa.....	64
Figura 26 - Análise de conteúdo na comunicação.....	68
Figura 27 - Etapas da análise de conteúdo.....	69
Figura 28 - Gráfico <i>BOX-PLOT</i> da variável de <i>input</i>	71
Figura 29 - Gráfico <i>BOX-PLOT</i> da variável de <i>output</i> açúcar.....	72
Figura 30 - Gráfico <i>BOX-PLOT</i> da variável de <i>output</i> etanol.....	72

Figura 31 - Gráfico de dispersão entre as variáveis moagem e açúcar.....	73
Figura 32 - Gráfico de dispersão entre as variáveis moagem e etanol.....	74
Figura 33 - Classificação por localização.....	75
Figura 34 - Classificação por tamanho.....	75
Figura 35 - Análise do relacionamento entre variáveis do estudo.....	80
Figura 36 - Resultado do relacionamento entre variáveis.....	90
Figura 37 – Modelo lógico dos resultados verificados.....	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Problema de pesquisa	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Importância do estudo	18
1.4. Estrutura do trabalho	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. A agroindústria canavieira.....	21
2.2. O processo produtivo da agroindústria canavieira	32
2.2.1. Etapas do processo produtivo	32
2.2.2. Tecnologias do processo produtivo	36
2.2.2.1. Extração do caldo da cana-de-açúcar	36
2.2.2.2. Limpeza da cana-de-açúcar.....	37
2.2.2.3. Tratamento do caldo da cana-de-açúcar.....	38
2.2.3. Aspectos edafoclimáticos da cana-de-açúcar.....	39
2.2.4. Variedade genética da cana-de-açúcar	43
2.3. Eficiência operacional através da técnica DEA na agroindústria sucroalcooleira	44
2.4. Análise Envoltória de Dados (DEA).....	45
2.4.1. Decision Making Unit (DMU).....	51
2.4.2. Modelos de Análise Envoltória de Dados.....	51
3. METODOLOGIA	57
3.1. Classificação da pesquisa	57
3.2. Método de pesquisa	57
3.2.1. Método de pesquisa quantitativo	58
3.2.1.1. Escolha e orientação do modelo DEA	59
3.2.1.2. Caracterização e tratamento dos dados	61
3.2.2. Método de pesquisa qualitativo	62
3.2.2.1. Protocolo do estudo de múltiplos casos	63
3.2.2.1.1. Visão geral do projeto de estudo de caso	63
3.2.2.1.2. Procedimentos de campo	65

3.2.2.1.3. Questões do estudo de múltiplos casos	66
3.2.2.1.4. Guia para o relatório do estudo de caso	67
3.2.2.2. Técnica para análise dos resultados qualitativos.....	67
4. RESULTADOS	70
4.1. Resultados da pesquisa quantitativa	70
4.1.1 Análise descritiva dos resultados	70
4.1.2 Scores de eficiência.....	76
4.1.3 Eficiência operacional e a variável localização	77
4.1.4 Eficiência operacional e a variável tamanho	78
4.2. Resultados da pesquisa qualitativa	78
4.2.1. Descrição esquemática do estudo de múltiplos casos.....	80
4.2.1.1. Estudo de caso usina A	80
4.2.1.2. Estudo de caso usina B.....	82
4.2.1.3. Estudo de caso usina C.....	83
4.2.1.4. Estudo de caso usina D	84
4.2.2. Resultados encontrados no estudo de múltiplos casos.....	86
4.2.2.1. Influência da variável localização na eficiência operacional	87
4.2.2.2. Influência da variável tamanho na eficiência operacional	88
4.2.3. Triangulação dos resultados da pesquisa	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5.1. Conclusões.....	92
5.2. Limitações do estudo.....	93
5.3. Recomendações para trabalhos futuros	94
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE A - ROTEIRO DE QUESTÕES DO ESTUDO DE CASO	101

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa aborda a eficiência operacional de usinas produtoras de açúcar e etanol no território brasileiro para a safra 2008/2009, por meio da aplicação da técnica de Análise Envoltória de Dados (DEA) e posterior estudo de caso visando o entendimento em profundidade das variáveis que influenciam este processo.

De acordo com *The World Bank* (2012), o Brasil é a sexta economia do mundo, com um PIB de US\$ 2.476.652. O Brasil é o líder mundial na produção de café, cana-de-açúcar e laranjas, tem como principais produtos agropecuários a soja, a carne, o açúcar/etanol, o café, a laranja, o milho, a mandioca e o tabaco (PEREIRA; TEIXEIRA; RASZAP-SKORBIANSKY, 2010).

Dentre as várias culturas hoje produzidas no Brasil, a agroindústria da cana-de-açúcar tem grande relevância no país. 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. De acordo com Torquato, Martins e Ramos (2009) a ocupação de novas regiões do território brasileiro, juntamente com o aumento da demanda, além das questões ambientais hoje em pauta na sociedade, foram fatores que impulsionaram a expansão da produção de cana-de-açúcar no Brasil. As estatísticas da União da Indústria da Cana-de-açúcar - UNICA (2011) corroboram tal afirmação, indicando que o processamento de cana-de-açúcar entre a safra 2001/2002 e 2008/2009 teve um aumento de 94%, enquanto a produção de açúcar e de etanol, neste mesmo período, teve um aumento de, respectivamente, 62% e 138%. A produção de açúcar e de etanol no Brasil é um componente chave na estratégia de desenvolvimento rural e energético no Brasil (MARTINELLI ET AL., 2011).

Segundo Bragato et al. (2008) o setor sucroalcooleiro brasileiro é propulsor de desenvolvimento, com expressiva dimensão social e base de sustentação econômica do país. Corroborando a afirmação anterior, Torquato, Martins e Ramos (2009), destacam que as unidades produtivas do setor sucroalcooleiro devem buscar a eficiência no uso dos insumos empregados na produção, adequando-se a um novo modelo de produção, que leva em consideração o crescente aumento da concorrência e a otimização da produtividade.

É relevante, portanto, estudar a eficiência de usinas que processam essa cultura produzindo açúcar e etanol e verificando possíveis alternativas para a melhoria nos processos produtivos a partir de decisões que tenham como objetivo maior eficiência. Também torna-se importante

um estudo que explore as variáveis que influenciam a eficiência visando suporte ao processo de decisão de escolha do local e das tecnologias de uma nova planta energética.

No que se refere à técnica DEA, Ferreira e Gomes (2009) afirmam que os modelos DEA são ferramentas cada vez mais utilizadas na tomada de decisões estratégicas em organizações empresariais e, dessa forma, efetivas quando objetiva-se comparar a eficiência de diferentes unidades. A técnica permite analisar a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar.

Cooper, Seiford e Tone (2007) definem a técnica DEA 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.

1.1. Problema de pesquisa

O problema de pesquisa desta dissertação pode ser resumido na seguinte pergunta:

Qual é o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil, considerando a safra 2008/2009?

1.2. Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos deste trabalho.

1.2.1. Objetivo geral

Verificar o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil, considerando a safra 2008/2009.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são os seguintes:

- Analisar a eficiência operacional das usinas produtoras de açúcar e etanol no Brasil na safra 2008/2009 através da aplicação da técnica DEA;
- Relacionar *ranking* de eficiência com tamanho e localização das usinas no Brasil;

- Realizar entrevista com especialistas e pesquisadores do setor sucroalcooleiro;
- Pesquisar o impacto das novas tecnologias na eficiência operacional do processo produtivo das usinas.
- Realizar estudo de múltiplos casos visando investigar em profundidade os resultados quantitativos, encontrados através da aplicação da técnica DEA.

1.3. Importância do estudo

De acordo com Thanassoulis (2001), a técnica DEA foi inicialmente desenvolvida como um método de apoio para a comparação da eficiência organizacional de unidades de negócios como filiais de bancos, escolas, departamentos e restaurantes hospitalares. De acordo com Allen e Thanassoulis (2004), a técnica DEA é frequentemente utilizada na avaliação da eficiência relativa de escolas e bancos. Através desse tipo de estudo é possível analisar o impacto dos insumos nos resultados de uma empresa, quais os insumos que estão mais relacionados com a geração de valor, quais as possibilidades de otimização no uso destes e, conseqüentemente, como otimizar os ganhos da organização através da melhoria de cada unidade de negócio.

A cana-de-açúcar ocupa cerca de sete milhões de hectares no território brasileiro, o que corresponde a cerca de 2% de toda a terra arável do país, que é o maior produtor mundial, seguido por Índia, Tailândia e Austrália; isso a torna uma das principais culturas hoje cultivadas no país, responsável por centenas de milhares de empregos diretos (UNICA, 2011). De acordo com Ensinas et al. (2007), a indústria da cana-de-açúcar representa uma das atividades econômicas mais importantes do Brasil, sobretudo em virtude da alta eficiência e competitividade. Corroborando tal afirmação, Maule, Mazza e Martha Junior (2001) definem a cana-de-açúcar como uma das melhores opções dentre as fontes de energia renováveis, ela representa, portanto, uma grande oportunidade no cenário agrícola brasileiro e um futuro promissor no cenário mundial.

Além da importância da agroindústria canavieira para o país, existem oportunidades para crescimento e maiores investimentos. Ainda de acordo com a UNICA (2011), para gerenciar e equilibrar produção e demandas setoriais, a iniciativa privada tem procurado criar instrumentos de mercado, como operações futuras, e desenvolver novas oportunidades para o açúcar e etanol, por meio da queda das barreiras protecionistas e do empenho em transformar o etanol numa ‘*commodity*’ ambiental. Utilizada na produção de açúcar, álcool combustível e

mais recentemente, biodiesel, a cana-de-açúcar tem sido objeto de estudo como possíveis soluções para questões ambientais hoje em pauta. Gallagher et al. (2005), Contreras et al. (2009), Ingaramo et al. (2009), Perrin et al. (2009) Andrade et al. (2010), Leboreiro e Hilay (2011), Freitas e Kaneko (2011) realizaram estudos recentes sobre as perspectivas da agroindústria produtora de açúcar e etanol no Brasil.

Portanto, é possível dizer que existe hoje esforço crescente e uma tendência de desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar no processo produtivo de usinas do setor sucroalcooleiro (PAIVA; MORABITO, 2007). Segundo Dias et al. (2011), isso acontece porque será necessário não apenas um aumento na área cultivada de cana-de-açúcar, mas também melhorias no cultivo da cana-de-açúcar para que seja possível produzir uma maior quantidade de produtos derivados da cana por hectare.

A eficiência em usinas de cana-de-açúcar é, portanto, relevante, assim como o desenvolvimento de estudos verificando possíveis alternativas para a melhoria nos processos produtivos, fornecendo direcionamentos no processo de decisão de implantação de novas plantas energéticas, tendo como objetivo uma maior eficiência operacional.

De acordo com Ferreira e Gomes (2009), os modelos DEA são ferramentas técnicas cada vez mais utilizadas no estudo da eficiência em organizações. Esta ferramenta permite analisar a eficiência de diversas unidades de forma simultânea, com o intuito de verificar qual delas é considerada mais eficiente dado um número de *inputs* e de *outputs*.

A técnica DEA é, portanto, uma ferramenta fundamental para este estudo, sem a qual os objetivos aqui propostos não poderiam ser verificados.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos que abordam a contextualização do problema de pesquisa, a revisão bibliográfica, os procedimentos metodológicos, apresentação e análise dos resultados e as considerações finais.

No capítulo 1 são apresentados os aspectos introdutórios da pesquisa, o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos e a justificativa da realização do estudo.

O capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica.

Os procedimentos metodológicos estão detalhados no capítulo 3, na qual são realizadas considerações a respeito da classificação da pesquisa, da coleta e tratamento dos dados, do método de pesquisa utilizado e da modelagem da ferramenta aplicada na pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados verificados no estudo, inicialmente na etapa quantitativa, através de uma análise descritiva e em seguida dos resultados do modelo DEA desenvolvido e, finalmente, uma descrição detalhada dos resultados obtidos por meio das técnicas qualitativas do estudo.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para melhor compreensão sobre o problema de pesquisa, faz-se necessária a revisão bibliográfica sobre o setor canavieiro no Brasil, suas tendências, principais características, importância para o país e impacto na economia brasileira nos últimos anos. Também faz-se necessária uma revisão bibliográfica do solo, do clima e do processo produtivo, visando compreender os principais fatores do processo de produção do açúcar e do etanol.

O tema de eficiência nas usinas de cana-de-açúcar no Brasil estabelece o relacionamento do objeto de estudo desta pesquisa e da técnica utilizada.

A revisão bibliográfica sobre a técnica DEA envolve considerações sobre as Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs), sobre o modelo matemático de pesquisa operacional envolvido na técnica aplicada neste estudo e, finalmente, sobre o Modelo de Retorno de Escala Constante (CCR) e o Modelo de Retorno de Escala Variável (BCC).

O Quadro 1 apresenta os marcos teóricos dos principais temas da pesquisa apresentados nesta revisão bibliográfica.

Quadro 1 - Marcos teóricos da pesquisa

Temas	Autores
A Agroindústria Canavieira	SMEETS ET AL. (2008); COLIN (2009); MARTINELLI ET AL. (2011).
O Processo Produtivo da Agroindústria Canavieira	KRAJNC, GRAVIC (2009); ENSINAS ET AL. (2007).
Solo e clima	NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT (2012); AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA (2012)
Eficiência	FARRELL (1957); LOVELL (1993).
Análise Envoltória de Dados (DEA)	FARRELL (1957); CHARNES, COOPER, RHODES (1978); BANKER, CHARNES, COOPER (1984).

2.1. A 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 da cana-de-açúcar até a

década de 1970, quando o governo brasileiro introduziu um programa chamado Proálcool que tinha como objetivo estimular a produção e consumo de etanol no país.

A Figura 1 apresenta a localização de plantações de cana-de-açúcar e de usinas produtoras de açúcar e de etanol no território brasileiro. Como pode ser observada na Figura 1, a produção de cana-de-açúcar se expande de forma significativa nas Regiões Sudeste, Centro-Oeste e em parte da região Sul (TORQUATO; MARTINS; RAMOS, 2009).

Fonte: UNICA (2011)

Figura 1 - Indústria de cana-de-açúcar no Brasil

De acordo com Torquato, Martins e Ramos (2009) a ocupação de novas regiões do território brasileiro, juntamente com o aumento da demanda, envolvendo também as questões ambientais, foram fatores que impulsionaram a expansão da produção de cana-de-açúcar no Brasil. A Figura 2 corrobora tal afirmação, na medida em que a capacidade total de processamento de cana-de-açúcar, medida em toneladas, no Brasil, aumentou de forma significativa nas safras de cana-de-açúcar nas duas últimas décadas.

Fonte dos dados: UNICA (2011)

Figura 2 - Processamento total de cana-de-açúcar no Brasil

A curva da produção anual de etanol é apresentada na Figura 3, na qual é possível verificar um crescimento acentuado nos últimos anos.

Fonte dos dados: UNICA (2011)

Figura 3 - Produção total de etanol no Brasil

Se considerarmos um horizonte maior de tempo, segundo a UNICA (2011), houve um crescimento de 116% na produção de etanol entre as safras 91/92 e 08/09. No que se refere ao crescimento na produção de açúcar, esse foi de 261%, conforme observado na Figura 4.

Fonte dos dados: UNICA (2011)

Figura 4 - Produção total de açúcar no Brasil

De acordo com Wojtczak, Biernasiak e Papiewska (2012), a produção mundial de açúcar é de 160 milhões de toneladas por ano e apresenta uma clara tendência de aumento, no ano de 2019/2020 está prevista uma produção anual de açúcar de 200 milhões de toneladas. Segundo Jank et al. (2001), no entanto, a agroindústria brasileira possui algumas restrições quanto à exportação em virtude de barreiras impostas por alguns países para proteger suas produções domésticas de açúcar.

Porém, de acordo com Neves, Zylberstajn e Neves (2005), 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.

De acordo com Martinelli et al. (2011) a produção de açúcar e de etanol no Brasil é um componente chave na estratégia de desenvolvimento rural e energético no país, haja vista a participação da produção de cana-de-açúcar dentre o total de produção de lavouras temporárias no Brasil para o ano de 2009, representado na Figura 5.

Para o ano de 2009, a produção de cana-de-açúcar corresponde a 79% do valor total produzido, em toneladas, de lavouras temporárias no Brasil, o que torna evidente a importância dessa cultura.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 5 - Quantidade produzida lavoura temporária no Brasil

No entanto, a rápida expansão da produção de etanol no Brasil, sobretudo no estado de São Paulo, responsável por 62% do total da produção no país, levantou uma grande quantidade de questões relativas ao impacto ambiental dessas atividades (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). A produção de açúcar e de etanol tem sido largamente criticada devido aos impactos ambientais causados ao meio ambiente, de acordo com Martinelli et al. (2011).

Em estudo realizado no estado de São Paulo, Martinelli et al. (2011) defendem a ideia de que as atividades envolvidas na produção de açúcar e de etanol podem ter um impacto muito positivo no desenvolvimento humano local, se comparado a outras atividades agrícolas também desenvolvidas no Brasil, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento rural da região. No entanto, se não controlada, a produção pode causar danos ambientais e sociais significativos que devem ser minimizados de forma a não se sobrepor aos benefícios proporcionados pela indústria canavieira.

Dentro desse contexto da importância da indústria para o país, o estado de São Paulo tem grande significância, uma vez que na safra 08/09 respondeu por 60,8% do total de cana-de-açúcar processada no Brasil e, segundo Smeets et al. (2008), corresponde à região mais importante do mundo na produção de etanol, representando 21% da produção mundial.

Vários estados aumentaram a quantidade de cana-de-açúcar processada nos últimos anos, no entanto, o estado de São Paulo foi aquele que apresentou maior crescimento, conforme pode ser verificado na Figura 6.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 6 - Processamento de cana-de-açúcar por unidade da federação

Na safra 2008/2009, 60,85% do valor total da produção de cana-de-açúcar no Brasil, em toneladas, vem do estado de São Paulo (UNICA, 2011). Neste estado foram produzidas 346.292.969 toneladas de cana-de-açúcar, enquanto para essa mesma safra, no Brasil, foram produzidas 569.062.629 toneladas. A rápida expansão da produção de etanol no Brasil, sobretudo no estado de São Paulo, levantou uma grande quantidade de questões relativas ao impacto ambiental dessas atividades (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). De acordo com Martinelli et al. (2011) a produção de açúcar e de etanol tem sido largamente criticada devido aos impactos ambientais.

Os mesmos autores realizaram um estudo no estado de São Paulo, no qual defendem a ideia de que as atividades envolvidas na produção de açúcar e de etanol podem ter um impacto muito positivo no desenvolvimento humano local se comparado a outras atividades agrícolas também desenvolvidas no Brasil, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento rural da região. Neste contexto da importância da indústria para o país, o estado de São Paulo

tem grande relevância, já que corresponde à região mais importante do mundo na produção de etanol, representando 21% da produção mundial (SMEETS ET AL., 2008).

O aumento da produção de açúcar por estado está representado na Figura 7, na qual o estado de São Paulo tem grande participação.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 7 - Produção de açúcar por unidade da federação

De acordo com Martinelli et al. (2011), o estado de São Paulo é hoje responsável por metade da área destinada à plantação de cana-de-açúcar no Brasil. No entanto, esse estado responde por 60% do total de cana-de-açúcar disponível para processamento.

A importância do estado de São Paulo fica evidente na Figura 8, que apresenta a evolução da quantidade produzida de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 8 - Produção de etanol por unidade da federação

É possível observar que o estado de São Paulo teve um crescimento significativo nesse período no que se refere à quantidade de cana-de-açúcar processada e, consequentemente, na produção de açúcar e de etanol. Tais figuras corroboram, portanto, as afirmações de Martinelli et al. (2011) de que o estado de São Paulo representou um crescimento mais rápido na indústria canavieira na última década, o que permitiu que fosse desenvolvida na região uma maior infraestrutura para o cultivo de cana-de-açúcar e produção de açúcar e de etanol.

De acordo com Smeets et al. (2008) os fatores que explicam o maior desenvolvimento da indústria canavieira no estado de São Paulo são o solo fértil, o clima favorável, a infraestrutura e o programa Proálcool. Martinelli et al. (2011), de forma complementar, menciona outros fatores que são decisivos para o maior desenvolvimento da indústria na região, como o alto grau de urbanização, sendo que os centros urbanos servem como grandes mercados consumidores para o açúcar e o etanol produzidos nas usinas da região e também o rápido desenvolvimento da indústria na última década, o que facilita a produção e comercialização das mercadorias dentro do estado.

Existem também fatores externos que têm contribuído para o desenvolvimento da agroindústria da cana-de-açúcar, como a alta demanda externa pelo açúcar e pelo etanol brasileiro. Alguns fatores que explicam essa alta demanda, de acordo com Camargo et al. (2008), são a alta do preço do petróleo, o lançamento de veículos *flex-fuel* e o fato de o etanol

ser considerado um combustível renovável, o que vem contribuindo de forma significativa para o aumento das exportações brasileiras.

No que se refere ao mercado externo, em 2007, o Brasil exportou 19.364.500 toneladas de açúcar, enquanto, em 2008, esse valor aumentou para 19.472.500 toneladas. Quanto ao etanol, o Brasil exportou o equivalente a 5.118.700 toneladas em 2007 e 3.308.400 toneladas dessa mercadoria em 2008 (UNICA, 2011).

Dessa forma, levando em consideração a importância da exportação dos produtos provenientes da cana-de-açúcar para o Brasil, a Figura 9 e a Figura 10 apresentam os valores, em milhares de toneladas exportadas de açúcar e de etanol, respectivamente, por país.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 9 - Exportação brasileira de açúcar

Em relação à importação de açúcar, a Rússia é o país que possui maior participação, seguido de outros países como Nigéria, Arábia Saudita, Egito, Irã, Emirados Árabes Unidos, Argélia, Canadá, Marrocos, Malásia, Síria, Bangladesh, Gana e Venezuela.

Os principais países consumidores do etanol brasileiros são diferentes daqueles países consumidores do açúcar brasileiro, sendo que os Países Baixos e os Estados Unidos se destacam como sendo os países que importam maior quantidade de etanol do Brasil.

Fonte dos dados: IBGE (2011)

Figura 10 - Exportação brasileira de etanol

Leite et al. (2009) desenvolveram um estudo sobre a capacidade de produção de etanol no Brasil, que confirma a importância da cultura da cana-de-açúcar no cenário global. Os autores afirmam que o aumento do uso de petróleo, combinado com a preocupação mundial com a questão do aquecimento global, através da redução da emissão de CO₂ e o desenvolvimento de estratégias de geração de energia baseadas em combustíveis não-fósseis, são fatores favoráveis para a produção de etanol no Brasil. Dessa forma, o etanol é uma alternativa potencial para suprir parte da demanda mundial por combustíveis, particularmente se produzido de uma maneira sustentável.

Nos últimos anos, muita atenção tem sido dada para o desenvolvimento sustentável da agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil. De acordo com Goldemberg, Coelho e Guardabassi (2008), possíveis impactos negativos da produção de etanol no Brasil são os danos causados em áreas de alta biodiversidade, desmatamento, degradação ou danos causados no solo por meio do uso de produtos químicos e descarbonização do solo, contaminação de recursos hídricos, uma possível competição entre produção de alimentos e produção de combustíveis e, finalmente, uma piora nas condições de trabalho. Andrade et al. (2010) realizaram um estudo na cidade de Araraquara, no interior do estado de São Paulo, sobre o impacto ambiental da queimada da cana-de-açúcar como um processo para facilitar a colheita. Como resultado do estudo, foi verificado que a queimada da cana-de-açúcar é o principal fator que contribui para

altos níveis de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos detectados durante a temporada de colheita.

No entanto, Martinelli, Garrett, Ferraz e Naylor (2011) fazem uma síntese de medidas governamentais que vem sendo tomadas junto a órgãos que regulamentam a produção de açúcar e de etanol no Brasil para controlar o impacto ambiental causado pela agroindústria canavieira, como a eliminação da queimada até o ano de 2014, a proibição do cultivo da cana-de-açúcar na Amazônia e no Pantanal para prevenir a degradação ambiental em biomas ecologicamente críticos e atividades de responsabilidade social acordadas entre a UNICA e grandes empresas que atuam no setor, como sendo necessárias para o bom desenvolvimento da cadeia produtiva de açúcar e de etanol.

Muitas críticas são feitas ao processo de queimada da cana-de-açúcar. De acordo com Ribeiro (2008), a queima da cana na pré-colheita objetiva eliminar seu resíduo, a palha, para facilitar a colheita manual, que no Brasil corresponde a 75% da produção total, enquanto, no estado de São Paulo, a colheita manual corresponde a 60%.

Por outro lado, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta uma série de benefícios do ponto de vista ambiental, como a eliminação de compostos de chumbo da gasolina, a redução de emissões nocivas, além da redução na emissão de CO₂, já que o etanol proveniente da cana-de-açúcar demanda apenas uma pequena quantidade de combustíveis fósseis para sua produção (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Bragato et al. (2008) também estudaram o setor de cana-de-açúcar sob a ótica ambiental e analisaram a responsabilidade social corporativa no ambiente organizacional das usinas de cana-de-açúcar. O estudo constatou que o foco das ações sociais está concentrado nas áreas educacional (40% dos projetos) e ambiental (25% dos projetos); essas não possuem nenhuma relação com o porte das usinas.

Portanto, a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil tem um grande potencial de geração de riqueza, no entanto, essa se encontra ainda em desenvolvimento e esse deve ocorrer de forma sustentável para garantir a vantagem competitiva do Brasil no longo prazo, possibilitando uma participação global mais relevante.

De acordo com Neves, Zylberstajn e Neves (2005), houve um avanço muito positivo em relação a novas tecnologias na agroindústria brasileira nos últimos anos, como sistemas de

irrigação localizada, máquinas eficientes, sistemas de monitoramento por satélite, mas também em relação à gestão agropecuária, por meio de uma profissionalização da gestão.

Tais fatores contribuem para uma maior eficiência das operações produtivas no país, o que gera maiores ganhos para a agroindústria no Brasil, que reflete em maiores investimentos. Uma técnica matemática para estudar esta eficiência operacional é a chamada DEA.

2.2. O processo produtivo da agroindústria canavieira

A seguir serão apresentados aspectos relativos ao processo de produção do açúcar e do etanol na usina de cana-de-açúcar, dos maquinários e das tecnologias utilizadas.

2.2.1. Etapas do processo produtivo

Segundo Ferreira e Gomes (2009), o processo produtivo pode ser definido como uma técnica por meio da qual um ou mais produtos são obtidos a partir de determinadas quantidades de insumos. A operação e o design do processo produtivo estão relacionados com a seleção e utilização ótima dos recursos de uma usina de cana-de-açúcar ao longo do tempo, procurando maximizar a eficiência dos equipamentos da unidade produtiva (HELUANE ET AL., 2007).

De acordo com Goldemberg e Guardabassi (2009), medidas vêm sendo tomadas para satisfazer a crescente demanda por combustível etanol no Brasil. Segundo Dias et al. (2011) será necessário não apenas um aumento na área cultivada, mas também melhorias no cultivo da cana-de-açúcar para que seja possível produzir uma maior quantidade de etanol por hectare, além do desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias nos processos já existentes a fim de obter uma maior quantidade de etanol por tonelada de cana-de-açúcar. Dessa forma, faz-se necessária a descrição do processo de produção do açúcar e do etanol.

A Figura 11 apresenta um fluxograma simplificado dos processos básicos de produção de açúcar e de etanol, na qual as operações são as mesmas até a fase de extração do caldo da cana-de-açúcar que, posteriormente, é encaminhada para o processo produtivo de açúcar ou para o processo produtivo de etanol. Existem, portanto, processos que são comuns na produção do açúcar e do etanol e processos que são exclusivos de cada produto.

Fonte: Adaptado de Krajnc e Gravic (2009)

Figura 11 - Fluxo básico do processo de produção de açúcar e de etanol

Na indústria de cana-de-açúcar são encontradas fábricas de açúcar, destilarias de etanol, fábricas integradas de açúcar e de etanol, que são capazes de produzir ambos os produtos. Krajnc e Gravic (2009) estudaram o processo produtivo do açúcar e do etanol sob a perspectiva das vantagens na eficiência operacional em virtude de processos e de operações conjuntas que envolvem os dois produtos.

Segundo Ensinas et al. (2007), nos últimos anos, a eletricidade tem se tornado também um novo produto, já que o bagaço da cana-de-açúcar pode ser usado como combustível para sistemas de cogeração. Segundo Morandin 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 sete subsistemas básicos. Parte do processo produtivo é comum para a produção de açúcar e de etanol. A fase comum compreende a plantação, cultivo e colheita da cana-de-açúcar, a pesagem, amostra e depósito da cana-de-açúcar na linha de produção. Em seguida, realiza-se

a fase de extração do caldo, que representa um insumo para a produção de açúcar e de etanol. Para a produção de açúcar realiza-se o processo de purificação, evaporação, cristalização e centrifugação até a produção final do açúcar. Para a produção de etanol, inicia-se pela fermentação, destilação, em seguida desidratação e finalmente tem-se o produto final etanol.

Na etapa que precede a extração do caldo, costuma-se realizar uma limpeza da cana-de-açúcar que tem como objetivo remover excessos de palha e terra que chegam do campo junto com a cana-de-açúcar e devem ser removidos antes de entrar no sistema (ENSINAS ET AL., 2007).

A Figura 12 apresenta cada um dos processos da linha de produção de forma detalhada.

O processamento industrial começa, portanto, com a chegada da cana-de-açúcar, que é lavada e preparada para a entrada na linha de produção para a extração do caldo. O caldo primário, secundário e o bagacilho são encaminhados para o processo de tratamento do caldo, enquanto o bagaço, após a extração do caldo, é encaminhado para a caldeira para a geração de vapor e de energia. Através do decantador é desenvolvido o preparo e a separação do lodo, o caldo é tratado e, se destinado para a produção de açúcar, deve ser encaminhado para o processo produtivo que passa pelo pré-evaporador, pelo evaporador, flotador, aquecedor, em seguida pela cristalização, centrifugação, secamento e, finalmente, o ensaque e comercialização do produto final. Caso o caldo tratado seja destinado para a produção de etanol, realiza-se a fermentação e centrifugação, que precedem a separação da vinhaça e as colunas de destilação.

A partir do processo industrial do açúcar e do etanol é interessante observar que além da possibilidade de geração de vapor e energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar, a usina é capaz de comercializar diferentes subprodutos, além do melaço, que pode ser utilizado na indústria alimentícia ou na forma de ração para animais.

Tem-se, portanto, um processo único para a produção de açúcar e de etanol, que tem início com a chegada da cana-de-açúcar na usina e permanece até a fase de tratamento, em seguida, o caldo tratado é destinado para a produção de açúcar ou de etanol.

Fonte: Grupo Farias (2012)

Figura 12 - Fluxo detalhado do processo de produção de açúcar e de etanol

2.2.2. Tecnologias do processo produtivo

Depois de verificado o processo produtivo em usinas de cana-de-açúcar, mostrou-se relevante também o levantamento bibliográfico de algumas tecnologias e processos importantes do ponto de vista da eficiência operacional.

2.2.2.1. Extração do caldo da cana-de-açúcar

Uma etapa importante do processo de produção de açúcar e de etanol é a extração do caldo. As tecnologias frequentemente utilizadas nesse processo são o difusor e a moenda. Nessa etapa, a usina procura extrair a maior quantidade de caldo com uma pequena quantidade de impurezas. O Quadro 2 apresenta um comparativo entre as duas tecnologias.

Quadro 2 - Comparativo entre moenda e difusor

	Difusor	Moenda
Extração	Por osmose; extração entre 97,5% e 98,5% de caldo.	Por pressão; extração entre 96,5% e 97,5% de caldo.
Qualidade da matéria-prima	Extração deficiente quando a matéria-prima possui baixo teor de fibra.	Não há dificuldades de extração relacionadas à qualidade da matéria-prima.
Índice de preparo da matéria-prima	Para eficiência satisfatória, obrigatório um índice de preparo de 90% a 92%.	Este índice não precisa ser alto, podendo variar entre 80% e 92% para o mesmo grau de eficiência.
Caldo	O caldo obtido é mais limpo e parcialmente clarificado, devido às impurezas retidas pelo bagaço.	Há bagacilho contido no caldo. Porém após peneiramento este caldo pode seguir para o setor de fabricação.
Bagaço	O bagaço é ruim para a queima, pois contém muitas impurezas e alta umidade.	Bagaço excelente para a queima (pouca umidade).
Custo inicial	Possui custo inicial maior	Existe a possibilidade de expansão dos ternos conforme necessidade/desejo.
Manutenção	Manutenção fácil e de baixo custo	Manutenção difícil e de alto custo.
Mercado consumidor	Modelo pouco utilizado no Brasil, porém em ascensão.	Modelo ainda priorizado nas usinas brasileiras.

Fonte: Adaptado de Nazato et al. (2010)

De acordo com Nazato et al. (2010), no processo de extração pelo difusor, a instalação e manutenção são mais econômicos, o caldo apresenta-se mais rico em sacarose e parcialmente clarificado e possui um balanço energético favorável, enquanto, na moenda, não há necessidade de uma matéria-prima de alta qualidade, existe uma fácil adaptação à entressafra, onde há escassez de cana-de-açúcar, é ideal para a queima em virtude da pouca umidade e os ternos de moenda podem ser ampliados, permitindo a expansão da quantidade moída de cana. É possível observar, portanto, que ambas as tecnologias possuem benefícios.

Uma etapa importante que antecede a fase de extração do caldo é a limpeza da cana.

2.2.2.2. Limpeza da cana-de-açúcar

O CTC desenvolveu, em parceria com o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), uma tecnologia de limpeza de cana-de-açúcar a seco, que funciona por meio de um processo de ventilação capaz de eliminar as principais impurezas existentes junto à cana-de-açúcar colhida em campo. 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 da palha (impurezas vegetais) e de grande parte da areia e terra (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 (JACARÉ, 2012).

Segundo Romão Junior (2009), a cana-de-açúcar picada, proveniente da colheita mecanizada, possui mais áreas de atração de impurezas, dessa forma, se a usina for realizar a limpeza da cana picada com água, a perda de açúcar será na ordem de 5%, inviabilizando tal medida.

Por isso, a tecnologia do SLCS vem como uma forma de viabilizar a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, que dispensa a necessidade da queimada, sem, no entanto, acarretar para as usinas de cana-de-açúcar uma perda rigorosa na eficiência produtiva.

Um grande benefício do SLCS é que ele reduz o consumo de água na usina e ainda possibilita a utilização da palha de cana-de-açúcar na geração de energia elétrica. O SLCS tem como principal finalidade separar as impurezas vegetais e minerais da cana, proporcionando ganhos financeiros a partir da utilização de um menor volume de água na linha de produção, ganhos na cogeração de energia, redução no consumo de potencia dos equipamentos de produção, redução dos desgastes de máquinas e equipamentos (SERMATEC, 2012). No entanto, a tecnologia também proporciona a remoção de impurezas que diminuem a eficiência

operacional na extração do caldo da cana-de-açúcar, permitindo um aumento na quantidade de moagem, uma melhoria na qualidade do caldo e melhoria no processo de fermentação.

O SLCS permite que parte das perdas resultantes do procedimento de lavagem com água e do processamento da cana na moenda, ou no difusor, seja evitada, removendo a palha do processo e impedindo que ela atrapalhe na fase de extração do caldo, de forma a diminuir o tempo de moagem, permitindo um ajuste da safra para um período maior de maturação da cana (ROMÃO JUNIOR, 2009). De acordo com o mesmo autor, uma tonelada de cana-de-açúcar possui, em média, 150 quilos de sacarose, o SLCS poderia evitar uma perda nesse volume de até 8%. Corroborando essa afirmação, a Empral (2012) afirma que um dos grandes benefícios da tecnologia é que ela evita grandes perdas de açúcar na fase de extração do caldo, o que contribui para a capacidade da usina de produzir uma maior quantidade de açúcar e etanol. Isso, conseqüentemente, pode aumentar a eficiência operacional da usina.

Segundo Romão Junior (2009, p. 59), “o custo de implementação da tecnologia de limpeza a seco está relacionado diretamente ao porte e às características operacionais de cada usina, sendo, de maneira geral, um investimento considerado ainda alto”.

2.2.2.3. Tratamento do caldo da cana-de-açúcar

O tratamento do caldo é uma etapa do processo de fermentação ou destilação do caldo. Segundo a Agência de Informação Embrapa (2012), o tratamento do caldo tem os seguintes objetivos: eliminação de impurezas grosseiras, que aumentam o desgaste dos equipamentos e diminuem a capacidade de produção; maximizar eliminação de partículas coloidais, responsáveis pela formação de espuma e por dificultarem a recuperação do fermento; preservação de nutrientes, vitaminas, açúcares, fosfato, sais minerais e aminoácidos livres; minimização de contaminantes microbianos.

A utilização do filtro para tratamento do caldo pode garantir uma maior eficiência operacional através da preservação de nutrientes, vitamínicos, 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 (AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA, 2012). Com o intuito de recuperar o açúcar contido no lodo, deve-se proceder com o processo de filtração, de forma a separar o caldo filtrado daquele retido no filtro. O caldo retorna ao processo produtivo e a torta, formada

basicamente pelos resíduos retirados na decantação, é utilizada na lavoura. Portanto, o filtro é capaz de reter impurezas contidas no caldo com um baixo teor de perda de sacarose. A capacidade de retenção de sólidos em suspensão do líquido extraído da cana-de-açúcar sobe de 52% a 62%, no sistema tradicional, para 92% a 94% através do filtro (REDETEC, 2012).

2.2.3. Aspectos edafoclimáticos da cana-de-açúcar

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. Os fatores mencionados são importantes para o presente estudo, pois interferem na produtividade de açúcar e de etanol. Segundo Lepsch (1987), o conhecimento das características de cada solo, que são os chamados fatores edáficos, é importante para julgar o potencial de produtividade do solo.

Na Figura 13, é possível verificar que existe, no estado de São Paulo, uma grande concentração de solos do tipo latossolo e terra roxa, que, de acordo com Staut (2012), pode proporcionar uma elevada produtividade, sobretudo se os devidos cuidados com o cultivo e tratamento da terra forem tomados devidamente. De acordo com a Agência de Informação Embrapa (2012) os principais tipos de solo no Brasil são os latossolos, os argissolos e os cambissolos.

Fonte: Portal Brasil (2012)

Figura 13 - Mapa de solos do território brasileiro

O conceito inicial de latossolo contemplava solos cujas características estavam relacionadas à intemperização e lixiviação intensas e responsáveis pelas baixas atividades das argilas. Os latossolos são frequentemente utilizados com culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento e normalmente estão situados em relevo plano a suave-ondulado, com declividade raramente superior a 7%, o que facilita o processo de mecanização. Apesar do alto potencial para agropecuária, parte de sua área deve ser mantida com reserva para proteção da biodiversidade desses ambientes (AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA, 2012).

Nos argissolos, segundo a Agência de Informação Embrapa (2012), constata-se grande diversidade nas propriedades de interesse para a fertilidade e para o uso agrícola (teor variável de nutrientes, textura, profundidade, presença ou ausência de cascalhos, pedras, ocorrência em diferentes posições na paisagem). Quando a fertilidade é elevada e não há grande incidência de pedras, a aptidão desse tipo de solo é boa para agricultura. O cambissolo é um solo pouco desenvolvido, cujas principais características são a pouca profundidade e a grande incidência de cascalhos. Ainda de acordo com a Agência de Informação Embrapa (2012), a terra roxa compreende solos de grande importância agrícola e elevado potencial produtivo.

Corroborando essa informação, Ker (1997) afirma que o latossolo roxo, comumente denominado terra roxa, é um tipo de solo de grande potencial agrícola e frequentemente encontrado no interior do estado de São Paulo. A Figura 14 apresenta a localização do latossolo roxo (terra roxa) no território brasileiro.

Fonte: EMBRAPA, 2012

Figura 14 - Mapa de solos do tipo latossolo roxo no território brasileiro

O Quadro 3, desenvolvido por Kofeler e Bonzelli (1987¹ apud NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT, 2012), indica critérios para classificar a produtividade dos solos, a partir da definição de parâmetros para definir características do solo que favorecem o cultivo.

Quadro 3 - Critérios para classificação da capacidade dos solos para o cultivo

características	solo bom	solo mediano	solo restrito	solo inapropriado
profundidade	profundo	médio	superficial	muito superficial
textura	argilosa	média a argilosa	arenoso	muito arenoso
relevo	plano	ondulado	muito ondulado	acidentado
fertilidade	alta	média ou baixa	muito baixa	muito baixa
drenagem	boa	média	incompleta	excessiva ou deficiente
restrições para mecanização	ausente	média	alta	muito alta
suscetibilidade para erosões	baixa	média	alta	muito alta

Fonte: Kofeler e Bonzelli (1987 apud NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT, 2012)

Além dos aspectos edáficos, é importante observar também os aspectos climáticos. A partir da Figura 15, pode-se verificar que o estado de São Paulo possui uma determinada região cujo clima é classificado como subtropical úmido e outra região cujo clima é classificado como tropical. Uma grande parte da costa brasileira apresenta o clima litorâneo úmido, enquanto a região Norte apresenta o clima equatorial úmido.

¹ KOFELER, N. F.; BONZELLI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

Fonte: Portal Brasil (2012)

Figura 15 - Mapa de clima do território brasileiro

Segundo o Netafim's Agriculture Department (2012) a qualidade do caldo da cana-de-açúcar é profundamente influenciada pelas condições climáticas prevalentes durante os vários subperíodos do crescimento do cultivo. Dessa forma, o clima favorável para o cultivo da cana-de-açúcar pode ser caracterizado por uma estação longa, quente, com chuva entre 1100 e 1500 mm, com uma boa distribuição, sobretudo com maior incidência nos meses de crescimento, além de uma estação razoavelmente seca, ensolarada e fresca.

De acordo com a Agência de Informação Embrapa (2012) a qualidade da cana-de-açúcar era determinada exclusivamente pelo teor de sacarose aparente. No entanto, atualmente, há uma definição que engloba características físico-químicas e microbiológicas dessa matéria-prima, que pode influenciar na recuperação do açúcar na usina e na qualidade do produto final. Como uma definição mais específica sai do foco do presente estudo, esta pesquisa trata da qualidade da cana-de-açúcar apenas considerando o teor de sacarose recuperado.

Sugere-se, portanto, que a combinação entre clima, solo e variedades genéticas determina a produtividade da cana-de-açúcar, de forma que as maiores produtividades são atingidas utilizando-se a variedade indicada ao seu ambiente de cultivo, em um solo com propriedades físicas, químicas e biológicas adequadas (AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA, 2012).

2.2.4. Variedade genética da cana-de-açúcar

Uma das principais organizações desenvolvedoras de variedades genéticas de cana-de-açúcar no Brasil é o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), um órgão privado brasileiro responsável pela gestão do plantio da cana-de-açúcar, bem como no desenvolvimento de variedades genéticas adequadas a diferentes realidades de solo e clima. O CTC foi fundado em 1969, com sede em Piracicaba, no interior do estado de São Paulo; possui 12 pólos regionais, oferece materiais adaptados para a realidade do agricultor em todas as regiões representativas da cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

Conforme pode ser observado no Quadro 4, os ambientes de produção são classificados pelo CTC em uma escala de A a E, na qual um ambiente de produção classificado como A apresenta condições edafoclimáticas que proporcionam alta produtividade, enquanto um ambiente de produção classificado como E apresenta condições que proporcionam menor produtividade. Dessa forma, conforme a época de colheita almejada, utiliza-se a variedade genética adequada para maximizar a produtividade no plantio da cana-de-açúcar.

Quadro 4 - Recomendações de manejo de variedades CTC

Variedades	Destaque	Ambiente de produção					Época de colheita							
		A	B	C	D	E	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
CTC1	precocidade													
CTC2	soqueira													
CTC3	soqueira													
CTC4	rica e produtiva													
CTC5	precocidade													
CTC6	produtividade													
CTC7	precocidade													
CTC8	soqueira													
CTC9	precocidade													

Fonte: CTC (2012)

Dessa forma, a variedade genética utilizada pela cana-de-açúcar depende da época que é conveniente a realização da colheita e do tipo de ambiente produção. Dessa forma, a usina de cana-de-açúcar é capaz de otimizar a produtividade para o ambiente de produção disponível, buscando a máxima eficiência operacional.

De acordo com a Agência de Informação Embrapa (2012), cada solo tem a sua aptidão agrícola. É importante levá-la em consideração no momento de plantio da cana-de-açúcar, utilizando a variedade genética adequada de acordo com a aptidão agrícola do solo.

2.3. Eficiência operacional através da técnica DEA na agroindústria sucroalcooleira

O tema de eficiência nas usinas de cana-de-açúcar estabelece o relacionamento do objeto de estudo desta pesquisa e da técnica utilizada. Mahadevan (2008), Salgado Junior et al. (2009) e Torquato et al. (2009) aplicaram a técnica DEA para estudar a eficiência na agroindústria sucroalcooleira.

Mahadevan (2008) estudou a eficiência do setor de cana-de-açúcar em Fiji através da técnica DEA, com orientação a *output*, na qual deseja-se diminuir a quantidade total de *inputs* sem, no entanto, diminuir a quantidade de produtos.

As variáveis que foram utilizadas no modelo DEA foram a quantidade de cana-de-açúcar colhida, em toneladas; a área total de cada fazenda; o total de horas trabalhadas; o uso do trator, em horas; a quantidade de fertilizante aplicado, em litros; o nível de erosão do solo e demais taxas pagas, medidos na moeda do país. Os dados para a pesquisa foram coletados junto a 677 fazendas escolhidas de forma aleatória, a partir de um *survey* na região oeste de Viti Levu. Como resultado da pesquisa foi verificado que as fazendas possuíam uma área média de 8,43 acres, a idade média dos fazendeiros era de 51,65, e possuíam em média 8,37 anos de formação educacional.

A partir da aplicação da técnica DEA, Mahadevan (2008) constatou que a variável território é aquela que mais contribui para a geração de *outputs*, já que um aumento de 1% no valor da área cultivada gera um aumento de 0,58% na produção de cana. O autor apresentou cinco modelos DEA na qual as variáveis foram manipuladas a fim de verificar eventuais modificações no resultados. Foram identificados alguns fatores de incerteza em relação à eficiência como os acordos de arrendamento de terras, a experiência e a qualificação educacional dos fazendeiros e da qualidade da terra.

Segundo Mahadevan (2008) a queimada da cana-de-açúcar é um fator que pode prejudicar a qualidade do solo, pela diminuição na colheita de resíduos e através da retenção de entulhos, que afeta a qualidade do solo em termos de melhoria da matéria orgânica.

Salgado Junior et al. (2009) desenvolveram um estudo no qual foi analisada a relação entre tamanho e eficiência operacional em usinas de cana-de-açúcar no nordeste do estado de São Paulo. A técnica DEA foi aplicada a partir de cinco variáveis de *input* (área plantada, número de funcionários, número de funcionários alocados no corte, consumo de fertilizante e volume de cana-de-açúcar processada) e duas variáveis de *output* (produção de açúcar e de etanol).

A amostra do estudo foi composta de forma aleatória por 26 usinas da região estudada e os dados referentes às variáveis foram obtidos a partir de questionários com questões abertas, enviados por e-mail. Optou-se pela aplicação do método DEA com o orientação aos *inputs*, com rendimentos de escala, ou seja, modelo do tipo BCC.

Tendo em vista que foram encontradas usinas de porte grande e pequeno no grupo das usinas eficientes, os resultados encontrados fornecem indícios de que a eficiência operacional não está diretamente relacionada à capacidade de moagem da usina, de acordo com Salgado Junior et al. (2009). A região estudada, por apresentar grandes plantas energéticas, suscita a necessidade de se melhor entender a relação entre eficiência operacional e tamanho (SALGADO JUNIOR ET AL., 2009).

Torquato et al. (2009) avaliaram a eficiência econômica das lavouras de cana-de-açúcar no estado de São Paulo através da aplicação da técnica DEA. Foram utilizadas como variáveis do estudo a área plantada, o custo de produção, os preços de arrendamento de terras e o valor da produção. Os dados foram coletados no Instituto de Economia Agrícola (IEA).

A região produtora de açúcar e etanol que se mostrou mais eficiente foi a região de Dracena, seguida por General Salgado, que, de acordo com os autores, são duas unidades onde a produção de cana-de-açúcar é recente e os preços de terras são os menores observados, o que indica que os valores de arrendamento de terras, utilizados na pesquisa como um insumo, são uma variável relevante para avaliar a eficiência da produção de açúcar e etanol, já que as regiões que apresentam um menor custo de arrendamento apresentaram uma maior eficiência.

2.4. Análise Envoltória de Dados (DEA)

De acordo com Cooper, Seiford e Tone (2007), a Análise Envoltória de Dados, ou Teoria da Fronteira, DEA (sigla inglesa para *Data Envelopment Analysis* ou *Frontier Analysis*) é uma técnica utilizada para avaliar o desempenho de um conjunto de unidades que são chamadas de *Decision Making Units* (DMUs) ou unidades tomadoras de decisão, que convertem múltiplos

insumos (*inputs*) em múltiplos produtos (*outputs*). *Decision Making Units* (DMUs), ou Unidades Tomadoras de Decisão, é o termo utilizado no método DEA para referenciar unidades homogêneas que utilizam insumos semelhantes para produzir produtos semelhantes, com autonomia para tomar decisões.

Neste contexto as DMUs têm como características processos produtivos semelhantes, que utilizam distintos níveis de insumos (*inputs*) para produzir diferentes quantidades de produtos (*outputs*). A análise DEA é sempre uma comparação em termos de eficiência entre o universo de unidades produtivas analisadas, chamadas de DMUs (ANDRADE; SANT'ANNA, 2011). DEA pode ser utilizada sempre que houver o interesse em avaliar a produtividade relativa de unidades comparáveis que se utilizem de um mesmo tipo de entradas (insumos), com o propósito de produzir um mesmo tipo de saídas múltiplas (produção efetiva), ou seja, quando se possa partir do pressuposto de que é possível medir o desempenho de unidades semelhantes que possuem diferentes gerenciamentos, almejam objetivos semelhantes e se desenvolvem sob as mesmas condições (MOREIRA; SANT'ANNA, 2010).

De acordo com Kassai (2002), as unidades analisadas podem ser grupos empresariais, empresas individuais, departamentos, divisões ou unidades administrativas e devem atender aos seguintes pré-requisitos: as unidades em análise devem ser comparáveis, devem atuar sob as mesmas condições, os fatores (insumos e produtos) devem ser os mesmos para cada unidade, diferindo apenas na intensidade ou magnitude.

Farrel (1957), inicialmente, delimita dois conceitos de eficiência: a eficiência técnica e a eficiência alocativa (ou preço). O primeiro se refere à capacidade de máxima produção dada uma determinada quantidade de insumos, enquanto a segunda se refere à combinação de proporções ótima dos insumos, dados os preços (custo) de cada um deles.

Em outras palavras, Sengupta (2000) afirma que a eficiência técnica mede o sucesso da DMU em produzir o máximo possível de *output* dado um determinado nível de *input*, enquanto a eficiência alocativa mede o sucesso de uma empresa em escolher uma combinação ótima de *inputs* com um determinado nível de preços de *input* ou de *output*. Dessa forma, é possível observar que a eficiência alocativa é apropriada a empresas que atuam em mercados competitivos.

Lovell (1993) considera o conceito de eficiência organizacional a partir da definição de produtividade, afirmando que por eficiência de uma unidade produtiva entende-se a comparação entre os valores ótimo e observado dos dados de *input* e de *output*. O Quadro 5 apresenta diversas definições do conceito de eficiência.

Quadro 5 - Definições de eficiência

Autor (ano)	Definição de eficiência
Farrell (1957)	Eficiência técnica é a capacidade da firma em obter o máximo de produto a quantidade de fatores disponível; e eficiência alocativa é descrita de acordo com uma determinada tecnologia e preços, a capacidade da firma utilizar os fatores de produção em proporção ótima, que minimize os custos de produção.
Ferreira (1997)	A eficiência está associada à melhor forma de fazer a coisa certa.
Tupy et al. (1998)	A eficiência de uma firma (ou unidade produtiva) é medida pela comparação entre valores observados e valores ótimos de insumos e produtos.
Bezerra Filho (2002)	O resultado obtido a partir da relação existente entre o volume de bens ou serviços produzidos (<i>outputs</i>) e o volume de recursos consumidos (<i>inputs</i>), visando alcançar o melhor desempenho na operacionalidade das ações de competência de uma organização.
Souza (2003)	A eficiência técnica refere-se à proficiência com que os insumos utilizados no processo de produção são convertidos em produtos.
Alves (2007)	Eficiência se refere à menor relação custo/benefício possível para alcançar os objetivos propostos de maneira competente, segundo as normas preestabelecidas, podendo, assim, ser traduzida sob a forma de indicadores de produtividade das ações desenvolvidas.
Oliveira (2007)	Fazer as coisas de maneira adequada; resolver problemas; salvaguardar os recursos aplicados; cumprir seu dever e reduzir os custos.

Fonte: Campello (2003)

Os conceitos de eficiência compõem a base para a teoria da eficiência do modelo DEA, que foi idealizada por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), que através de modelos matemáticos desenvolveram uma técnica a partir da qual, utilizando programação linear, é possível estabelecer padrões ótimos de eficiência. Sengupta (2000) afirma que o desenvolvimento da teoria da eficiência baseada em DEA seguiu três fases importantes. A primeira fase começou com o conceito de engenharia de eficiência, que foi aplicado por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) em uma formulação de programação linear para a comparação de DMUs. A segunda fase introduziu o conceito de eficiência alocativa, que leva a especificação de uma fronteira de custo ao invés de uma fronteira de produção. A terceira fase estendeu o conceito de eficiência

de custo, utilizando *inputs* e *outputs* como variáveis a serem escolhidas de forma ótima por cada empresa ou DMU, quando esta se depara com preços de mercado sob competição.

O conceito de DEA está, portanto, muito relacionado com o conceito de eficiência. A partir do relacionamento entre as variáveis de *input* e de *output*, é possível determinar as DMUs consideradas eficientes, e através delas estabelecer uma fronteira eficiente.

Quando utilizado um único *input* para a produção de um único *output*, é possível observar a relação entre as variáveis conforme demonstrado na Figura 16. Nesse caso a fronteira eficiente representa as DMUs classificadas como eficientes, enquanto aquelas abaixo da fronteira eficiente são as DMUs classificadas como ineficientes.

Fonte: Adaptado de Cooper, Seiford e Tone (2007)

Figura 16 - Fronteira eficiente de produção

Uma DMU pode ser classificada como ineficiente porque ela se encontra abaixo da fronteira eficiente, o que significa dizer que existe outra DMU capaz de produzir uma maior quantidade de produtos com a mesma quantidade de insumos, ou existe outra DMU capaz de produzir a mesma quantidade de produtos com uma menor quantidade de insumos. Na técnica DEA, portanto, a eficiência orientada a insumo, a *input*, representa a quantidade de insumos que pode ser reduzida sem diminuir a produção. A eficiência orientada a produção, a *output*, representa a capacidade de aumentar a produção sem aumentar a quantidade de insumos.

Com o aumento da quantidade de produtos, é possível haver uma maior economia de escala. Na Figura 17, desenvolvida por Farrell (1957), é possível observar uma linha de fronteira eficiente na qual se tem uma economia de escala, já que com um crescimento relativo menor de *inputs* tem-se um aumento relativo maior na quantidade de *outputs*.

Fonte: Farrell (1957)

Figura 17 - Economia de escala

A Figura 18, em contrapartida, apresenta a curva de uma fronteira eficiente na qual se tem uma deseconomia de escala, já que, com um crescimento relativo maior de *input*, tem-se um aumento relativo menor no eixo de *output*.

Fonte: Farrell (1957)

Figura 18 - Deseconomia de escala

Dessa forma, a economia de escala pode ser um aspecto fundamental na capacidade de uma DMU em produzir uma maior quantidade de produtos a partir de uma determinada quantidade de insumos e, portanto, aumentar a sua eficiência relativa.

De acordo com Farrell (1957), é fundamental que uma organização tenha conhecimento do comportamento dos pontos de ineficiência, já que a existência de uma economia ou de uma deseconomia de escala reflete nos resultados obtidos. Tais fatores são relevantes inclusive na capacidade de a organização realizar previsões futuras, que, de acordo com a sua escala, podem ser superestimadas ou subestimadas.

A Figura 19 apresenta uma fronteira eficiente de produção com dois *inputs* para um único *output*, na qual as DMUs mais eficientes estão localizadas na linha da fronteira eficiente, enquanto as DMUs ineficientes estão localizadas acima da fronteira eficiente, na qual é possível produzir uma maior quantidade de produtos com menor quantidade de insumos.

Fonte: Adaptado de Cooper, Seiford e Tone (2007)

Figura 19 - Relacionamento entre dois *inputs* e um *output*

Quando são necessários dois *inputs* para produzir um *output* são mais eficientes aquelas DMUs que utilizam uma combinação menor dos dois *inputs* disponíveis. Dessa forma, quanto menor a quantidade utilizada de cada um dos insumos para produzir um único produto, considera-se mais eficiente a DMU em questão.

Apesar da técnica DEA não exigir nenhum comportamento ou tipo de distribuição específico dos dados, de acordo com Cooper, Seiford e Tone (2000), existem alguns pré-requisitos para a aplicação da técnica DEA. Quando aplicada em um número de organizações deve-se atender aos requisitos: (1) as organizações devem ser comparáveis, ou seja, devem realizar as mesmas atividades e devem ter objetivos semelhantes; (2) devem ser utilizadas organizações que operam com múltiplos insumos e produtos; (3) as organizações do modelo devem utilizar os mesmo insumos e produtos, com diferenças apenas quanto à intensidade e magnitude; (4) as organizações devem atuar sob as mesmas condições de mercado; (5) o número de organizações a ser analisado deve ser pelo menos três vezes maior que o número de insumos e produtos considerados; (6) as variáveis devem ter dados numéricos positivos.

2.4.1. Decision Making Unit (DMU)

Decision Making Units (DMUs), ou Unidades Tomadoras de Decisão, é o termo utilizado no método DEA para referenciar unidades homogêneas que utilizam insumos semelhantes para produtos semelhantes e com autonomia para tomar decisões.

A Figura 20 ilustra o relacionamento entre as variáveis do modelo, que são os dados de insumos, ou *inputs*, e os dados de produtos, ou de *outputs*.

Fonte: Pimentel (2009)

Figura 20 - Elementos da DMU

$$\text{Eficiência da DMU} = i = (\mu^* y_i) / (v^* x_i) = (\mu_1 y_{1i} + \mu_2 y_{2i} + \dots + \mu_m y_{mi}) / (v_1 x_{1i} + v_2 x_{2i} + \dots + v_k x_{ki})$$

Na equação da eficiência da DMU, o valor u é um vetor ($m \times 1$) de pesos associados aos produtos e v é um vetor ($k \times 1$) de pesos associados aos insumos; y refere-se aos produtos; e x , aos insumos utilizados na i -ésima DMU.

2.4.2. Modelos de Análise Envoltória de Dados

De acordo com Ferreira e Gomes (2009), no modelo DEA com rendimentos constantes de escala, a medida de eficiência técnica de uma DMU ineficiente é igual à relação entre a sua

produtividade e a produtividade da DMU mais eficiente. A eficiência orientada a insumo de qualquer DMU que não esteja sobre a fronteira de possibilidade de produção é sempre igual à eficiência orientada a produto, já que as DMUs eficientes sobre a fronteira de possibilidades de produção nesse caso terão sempre eficiência técnica igual à unidade.

A Figura 21 apresenta o comportamento da reta da fronteira eficiente em um modelo DEA do tipo retorno de escala constante (CCR), na qual não há um ganho de escala a partir do aumento do número de insumos utilizados para determinado produto.

Fonte: Adaptado de Cooper, Seiford e Tone (2007)

Figura 21 - Gráfico do modelo DEA CCR

Segundo Ângulo Meza et al. (2007), na formulação matemática do modelo CCR considera-se que cada DMU k ($k=1 \dots s$) é uma unidade de produção que utiliza n *inputs* x_{ik} , $i = 1 \dots n$, para produzir os *outputs* y_{jk} , $j = 1 \dots m$, onde se busca maximizar 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.

Trata-se de um problema de programação fracionária que pode ser linearizado e transformado no Problema de Programação Linear (PPL) ilustrado em (1), onde h_0 é a eficiência da DMU o que está sendo analisada, x_{i0} e y_{i0} são, respectivamente, os *inputs* e *outputs* desta DMU e v_i e u_j são os pesos calculados para seus respectivos *inputs* e *outputs*.

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

De acordo com Cooper, Seiford e Tone (2007), a partir da base de dados, avalia-se a eficiência de cada DMU e realiza-se, portanto, n otimizações, uma para cada DMU avaliada no modelo DEA. 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:

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

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

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

Na qual, procura-se maximizar o resultado da DMU₀, sendo que o objetivo ótimo é um valor correspondente de θ 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.

$$\text{Max } \theta(\mu, v) = \mu_1 y_1 + \mu_2 y_2 + \dots + \mu_s y_s$$

sujeito a

$$v_1 x_1 + \dots + v_m x_m = 1$$

$$\mu_1 y_{1j} + \dots + \mu_s y_{sj} \leq v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj}$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s \geq 0$$

A partir do resultado verificado no problema de programação linear é possível identificar se uma DMU é eficiente (COOPER; SEIFORD; TONE, 2007):

- i. DMU₀ é eficiente se $\theta^* = 1$ e existe ao menos um valor ótimo de (v^*, u^*) , com $v^*, u^* > 0$.
- ii. Caso contrário, DMU* é ineficiente.

Banker, Charnes e Cooper (1984), posteriormente, criaram outro modelo DEA denominado BCC, que generaliza o modelo CCR, considerando tecnologias com rendimentos de escala constantes, crescentes e decrescentes, ou seja, rendimentos variáveis de escala. A Figura 22 apresenta o comportamento da fronteira eficiente quando determinada unidade tomadora de decisão apresenta economias de escala.

Fonte: Adaptado Cooper, Seiford e Tone (2007)

Figura 22 - Gráfico do modelo DEA BCC

Ainda segundo Ângulo Meza et al. (2007), o modelo BCC, também chamado de VRS (*variable returns to scale*), considera situações de eficiência de produção com variação de escala, sem assumir uma relação de proporcionalidade entre os *inputs* e os *outputs*. De acordo com os autores, a formulação do modelo BCC utiliza o problema de programação linear (PPL) ilustrado em (2).

No modelo apresentado em (2), h_0 é a eficiência da DMU que está sendo analisada, x_{ik} representam os seus *inputs* e y_{jk} os *outputs*, v_i e u_j , são os pesos calculados para os *inputs* i e para *outputs* j (respectivamente) e u é um fator que quando positivo indica que a DMU encontra-se em uma região de retornos decrescentes de escala e se negativo em uma região de retornos crescentes. Se a $h_0 = 1$, a DMU analisada é considerada eficiente.

$$\begin{aligned}
 \max \quad & h_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo} - u \\
 \text{sujeito a} \quad & \\
 & \sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1 \\
 & \sum_{r=1}^m u_r y_{rk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} - u \leq 0 \\
 & k = 1, \dots, s \\
 & u_j, v_i \geq 0 \quad \forall x, y \\
 & u \in \Re
 \end{aligned} \tag{2}$$

A Figura 23 apresenta um comparativo entre uma reta do modelo CCR, na qual não há um ganho de escala a partir do aumento do número de insumos, com uma curva tradicional do modelo BCC, na qual observa-se um ganho de escala.

Fonte: Adaptado Cooper, Seiford e Tone (2007)

Figura 23 - Comparativo entre modelos DEA CCR e BCC

Enquanto o modelo CCR é construído com base no pressuposto de retornos constantes de escala descritas pela fronteira de produção, extensões deste modelo foram desenvolvidas, dentre as quais o modelo BCC, em que retornos variáveis de escala são considerados (COOPER, SEIFORD, TONE; 2007). Se para um determinado estudo os resultados de eficiência técnica foram iguais para os dois modelos significa que não existe retorno variável de escala para as DMUs analisadas. No entanto, Ferreira e Gomes (2009) afirmam que, na maioria das vezes, é possível verificar que os escores de eficiência técnica dos modelos CCR são, na maioria dos casos, menores do que os da eficiência técnica dos modelos BCC.

3. METODOLOGIA

Esta seção compreende os aspectos metodológicos da pesquisa, inicialmente, pela caracterização do tipo de pesquisa realizada, pela descrição dos métodos utilizados para o alcance dos objetivos propostos, considerações a respeito da caracterização e do tratamento dos dados da pesquisa, da modelagem DEA e, finalmente, do protocolo de estudo de caso.

3.1. Classificação da pesquisa

O tipo de pesquisa utilizado nesta dissertação é a pesquisa explicativa.

De acordo com Gil (2002, p. 44), a pesquisa explicativa tem como “[...] preocupação central justificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência do fenômeno”. Richardson (2007, p. 66) também identifica como estudo explicativo aquele que “[...] deseja analisar as causas ou consequências de um fenômeno”.

Raupp e Beuren (2003) afirmam que a pesquisa explicativa, pela necessidade de explicar os determinantes na ocorrência de fenômenos, integra estudos de forma mais aprofundada. Andrade (2002) complementa que a pesquisa explicativa é um tipo de pesquisa mais complexa, pois, além de registrar, analisar, classificar e interpretar os fenômenos estudados, procura identificar os seus determinantes, aprofundando o conhecimento e buscando a razão para determinado fenômeno.

Em relação ao procedimento técnico utilizado, de acordo com Gil (2002), este estudo pode ser classificado também como uma pesquisa *ex-post facto*, cujo propósito básico é verificar a existência de relações entre variáveis, baseado em um fenômeno passado, com a aplicação de um estudo múltiplo de casos para avaliar em maior profundidade essa possível relação entre as variáveis estudadas na pesquisa.

3.2. Método de pesquisa

De acordo com Richardson (2007), método de pesquisa é a escolha de procedimentos sistemáticos para descrever e explicar fenômenos. O método de pesquisa deste estudo está dividido em duas partes, uma quantitativa e outra qualitativa. Esta pesquisa possui uma primeira fase, cujo método de pesquisa é quantitativo, por meio da aplicação da técnica DEA para a categorização e classificação do universo de usinas estudadas no que se refere a

eficiência operacional, e uma segunda fase, cujo método é qualitativo, na qual é realizado um estudo de múltiplos casos em usinas e entrevistas com especialistas nas quais os resultados foram descritos por meio da análise de conteúdo, objetivando conhecer e analisar em profundidade os resultados encontrados na primeira fase.

3.2.1. Método de pesquisa quantitativo

A primeira fase, de caráter quantitativo, compreende a utilização de dados de processamento de cana-de-açúcar em toneladas como *input* e de quantidade produzida de açúcar e de etanol, em toneladas, como *output*, para análise da eficiência operacional das usinas de cana-de-açúcar, que são as DMUs, através da aplicação da técnica DEA. De acordo com Richardson (2007) o método quantitativo é caracterizado pela utilização da quantificação tanto nas modalidades de coleta de informações, como no tratamento delas.

Nesta pesquisa, as variáveis tamanho, localização e eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar são analisadas a fim de avaliar o impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas no território brasileiro.

A Figura 24 apresenta o modelo lógico da fase quantitativa do presente estudo. Na qual estudou-se a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil a partir de uma variável de *input*, a quantidade de cana-de-açúcar e duas variáveis de *output*, a quantidade produzida de açúcar e de etanol, com o intuito de verificar o impacto das variáveis tamanho e localização. Ademais, procurou-se verificar indícios de que as variáveis tamanho e localização têm impacto na eficiência operacional das usinas de cana-de-açúcar.

Figura 24 - Modelo lógico da fase quantitativa da pesquisa

Inicialmente, a técnica DEA foi utilizada com o objetivo de identificar quais foram as usinas eficientes no Brasil na safra 2008/2009. A aplicação da técnica DEA foi realizada por meio da utilização do software *Frontier Analyst 4.1*, do fabricante Banxia Software®.

A base de dados utilizada nessa pesquisa foi organizada a partir do anuário da cana-de-açúcar da safra 2008/2009 e compreende os valores de quantidade total, em toneladas, de cana-de-açúcar moída por usina brasileira e os valores de quantidade total produzida, em toneladas, de açúcar e de etanol. As DMUs são as usinas de cana-de-açúcar, produtoras de açúcar e de etanol, presentes no território brasileiro, de acordo com o anuário da cana-de-açúcar da safra 2008/2009.

Para classificar o tamanho das usinas (grande, média e pequena) foi utilizada a categorização recomendada pela UNICA, na qual usinas com capacidade de moagem superior a 2,5 milhões de toneladas por safra são classificadas como "grande", usinas com capacidade de moagem de 1,0 milhão a 2,5 milhões de toneladas por safra são classificadas como "média" e usinas com capacidade inferior a 1,0 milhão de tonelada por safra são classificadas como "pequena".

3.2.1.1. Escolha e orientação do modelo DEA

A modelagem aplicada na técnica DEA exige a definição das DMUs, o levantamento das variáveis de avaliação na forma de *inputs* e *outputs* para a ferramenta e a definição do modelo DEA a ser utilizado.

Foi considerada mais adequada a utilização do modelo BCC, com orientação a *output*, por dois fatores principais: primeiro, pela impossibilidade de estabelecer uma relação de proporcionalidade entre *inputs* e *outputs* quando é considerada a operação produtiva de uma usina de cana-de-açúcar; segundo, relacionado à orientação aos *outputs*, consiste no crescente número de novas usinas de cana-de-açúcar no Brasil, o que leva à escassez dos recursos, considerando que a utilização eficiente pode aumentar o nível de competitividade destas organizações, a quantidade produzida de açúcar e de etanol.

As DMUs são as usinas de cana-de-açúcar, produtoras de açúcar e de etanol, presentes no território brasileiro, de acordo com o anuário da cana-de-açúcar da safra 2008/2009.

O Quadro 6 apresenta as variáveis consideradas nesta pesquisa, a classificação das variáveis de acordo com o modelo DEA em *input* e *output* e a definição técnica destas.

Quadro 6 - Classificação das variáveis

Variáveis	Classificação	Definição
Moagem (ton)	<i>Input</i>	Valor total, em toneladas de cana-de-açúcar, destinado à produção de açúcar e/ou etanol pela usina na safra 2008/2009.
Acúcar (ton)	<i>Output</i>	Valor total, em toneladas de açúcar, produzido pela usina na safra 2008/2009.
Etanol (ton)	<i>Output</i>	Valor total, em toneladas de etanol, produzido pela usina na safra 2008/2009.

Foram utilizadas, portanto, três variáveis operacionais de uma usina de cana-de-açúcar. Não foram consideradas neste estudo variáveis financeiras. O uso das três variáveis se deu em virtude de limitações da base de dados utilizada, uma vez que muitas usinas não forneciam vários dos dados complementares. Caso fossem exclusivamente utilizadas nesse estudo usinas que dispusessem de todos os dados, haveria uma grande limitação do número de usinas contempladas no estudo. Optou-se, portanto, pela análise da totalidade das usinas do anuário da cana-de-açúcar, em detrimento do número de variáveis no modelo.

Variáveis adicionais que constam na base de dados e que poderiam ser utilizadas seriam o número de empregos gerados pela usina, a extensão territorial colhida (em hectares) e a capacidade produtiva de energia e o consumo próprio. No entanto, se algumas dessas variáveis fossem contempladas no estudo, o número de usinas seria significativamente

reduzido e o presente estudo não mais levaria em consideração todo o universo de usinas do anuário.

3.2.1.2. Caracterização e tratamento dos dados

Para contemplar o objetivo deste trabalho, foram escolhidas como população-alvo as usinas de cana-de-açúcar listadas no anuário da cana-de-açúcar, na safra 2008/2009, atuantes no Brasil, que no total correspondem a 355 usinas, presentes em 16 unidades da federação.

A utilização do anuário da cana-de-açúcar na safra 2008/2009 se deu por conveniência, uma vez que do início da realização da tabulação dos dados e do início desta pesquisa correspondiam aos dados mais recentes disponíveis sobre a agroindústria de cana-de-açúcar.

A base de dados coletada é composta pelos valores individuais de moagem total, em toneladas, e os valores produzidos de açúcar e etanol, também medidos em toneladas e finalmente a localização e o tamanho das usinas.

Dessa forma, como apresentado na Tabela 1, do total de usinas listadas no anuário da cana-de-açúcar na safra 2008/2009, 60 usinas são classificadas como “grande”, 163 como “média” e 132 usinas como “pequena”.

Tabela 1 - Classificação de usinas por tamanho

Tamanho	Nº de usinas	Porcentagem
grande	60	16,9%
média	163	45,9%
pequena	132	37,2%

Na Tabela 2 é possível verificar o número de usinas instaladas em cada estado da federação, de acordo com o anuário da cana-de-açúcar na safra 2008/2009. Das 355 usinas listadas em tal documento, 170 estão localizadas no estado de São Paulo, o que corresponde a 48% do total. Se considerarmos os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Paraná, Alagoas e Pernambuco, estes correspondem a 86% do total de usinas instaladas no território brasileiro durante a safra 2008/2009.

Tabela 2 - Classificação de usinas por estado da federação

Localização	Nº usinas	Porcentagem
SP	170	48%
MG	32	9%
GO	28	8%
PR	28	8%
AL	24	6,75%
PE	23	6,5%
MS	14	3,5%
MT	11	3%
RJ	7	2%
ES	6	2%
PB	4	1%
BA	3	0,85%
MA	2	0,55%
AM	1	0,3%
SE	1	0,3%
RS	1	0,3%

Finalmente, as informações referentes às variáveis tamanho e localização apresentadas foram comparadas com os resultados da técnica DEA, objetivando analisar um possível impacto das variáveis na eficiência operacional nas usinas.

3.2.2. Método de pesquisa qualitativo

A segunda fase da pesquisa, de caráter qualitativo, compreende a realização de estudos de múltiplos casos em usinas de cana-de-açúcar, através da aplicação de visitas técnicas e de entrevistas semi-estruturadas junto a gestores dos departamentos agrícola e industrial das usinas com o intuito de investigar os resultados quantitativos obtidos na pesquisa. Além disso, foram realizadas entrevistas com especialistas do setor sucroalcooleiro, visando aumentar o conhecimento técnico no assunto.

De acordo com Richardson (2007), na entrevista semi-estruturada o pesquisador conhece previamente os aspectos relevantes da pesquisa, que deseja estudar e, com base neles, formula questões a serem tratadas na entrevista, na qual o entrevistado tem a liberdade de se expressar como preferir, sendo esse guiado pelo entrevistador, de acordo com os interesses do estudo. Uma vantagem da entrevista é que ela permite ao pesquisador obter *feedback* e fazer uso de auxílio visual se estiver na presença do entrevistado (HAIR ET AL., 2005).

De acordo com Hair et al. (2005) em uma entrevista semi-estruturada o entrevistador pode querer fazer perguntas relacionadas que não haviam sido originalmente consideradas e dessa forma ele fica livre para contribuir com novas questões relevantes que eventualmente podem surgir ao longo da entrevista. Portanto, as entrevistas semi-estruturadas possuem uma estrutura e orientações gerais, mas permitem flexibilidade para incluir questões adicionais, conforme necessário, ou de acordo com a conveniência para o desenvolvimento do estudo.

Nessa entrevista, os resultados encontrados através da técnica DEA, e demais análises relacionadas, foram levados em consideração com o intuito de perceber, por parte do gestor envolvido com as atividades organizacionais, a viabilidade e aplicabilidade das informações e conhecimentos possibilitados pela análise quantitativa realizada.

3.2.2.1. Protocolo do estudo de múltiplos casos

De acordo com Yin (2010), um estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real. O estudo de caso “[...] é uma categoria de pesquisa cujo objeto é uma unidade que se analisa aprofundadamente” (TRIVIÑOS, 1987). A pesquisa de estudo de caso inclui tanto estudos de caso único quanto de casos múltiplos (YIN, 2010). Espera-se que o estudo de múltiplos de casos permita um melhor entendimento dos resultados encontrados a partir da aplicação da técnica DEA.

O protocolo do estudo de caso, de acordo com Yin (2010), apresenta as seguintes seções:

- (1) visão geral do projeto de estudo de caso;
- (2) procedimentos de campo;
- (3) questões do estudo de caso;
- (4) guia para o relatório do estudo de caso.

3.2.2.1.1. Visão geral do projeto de estudo de caso

Para a elaboração da visão geral do projeto do estudo de múltiplos casos, foi utilizada a literatura existente no referencial teórico do presente trabalho. Também foram realizadas duas entrevistas com especialistas da agroindústria sucroalcooleira.

Dessa forma, foi possível desenvolver um modelo lógico da pesquisa qualitativa que busca alcançar os objetivos do protocolo dos estudos de múltiplos casos, apresentado na Figura 25, na qual a eficiência operacional de uma usina de cana-de-açúcar depende da variável A, qualidade da cana-de-açúcar, e da variável B, processo produtivo mais eficiente.

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.

Isso se justifica pelo fato de a cana-de-açúcar ser basicamente composta de água (73-76%), sólidos solúveis (10-16%) e fibras secas (11-16%), na qual os chamados sólidos solúveis são os compostos químicos que devem ser extraídos da biomassa bruta e convertida no produto desejado, enquanto o composto principal envolvido na produção de açúcar e de etanol é a sacarose, que é o maior componente dos sólidos solúveis (MORANDIN ET AL., 2011).

Figura 25 - Modelo lógico do protocolo de pesquisa

A fase qualitativa do estudo tem 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. O referencial teórico, juntamente com as entrevistas realizadas junto aos especialistas, possibilitou o desenvolvimento do modelo lógico do

protocolo de pesquisa para verificar através do estudo de múltiplos casos os resultados verificados na fase quantitativa do presente estudo.

3.2.2.1.2. Procedimentos de campo

As entrevistas com os especialistas foram realizadas com o intuito de aumentar o grau de familiaridade com o objeto de estudo e realizar ajustes nas questões do estudo de caso.

A primeira entrevista foi realizada no dia 28 de março de 2012, no prédio central da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), campus de Jaboticabal, junto a um professor Doutor da universidade, formado em agronomia e pesquisador e especialista na área de tecnologia industrial. A segunda entrevista, realizada no dia 13 de maio de 2012, foi realizada na sede de uma organização fornecedora de insumos para a plantação e cultivo de cana-de-açúcar, nascida em Batatais- SP, sendo realizada junto ao proprietário da organização.

Essas entrevistas foram de suma importância para o estudo na medida em que permitiram o melhor entendimento das variáveis selecionadas a partir do referencial teórico para o desenvolvimento das questões do estudo de múltiplos casos. O caráter não estruturado da entrevista possibilitou um maior acesso a informações e tópicos inicialmente não planejados.

Após estas entrevistas, foi desenvolvido o modelo lógico da Figura 25, o que possibilitou a estruturação da lógica a ser utilizada nas entrevistas nas usinas. Assim, 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.

A fim de resguardar a identidade das mesmas, elas serão identificadas ao longo da pesquisa como usina A, usina B, usina C e usina D. Na usina A foi realizada uma entrevista com o coordenador de qualidade agrícola, enquanto na usina B, uma entrevista realizada por telefone junto ao supervisor de controles agrícolas. Na usina C, visitas técnicas no campo, em frentes de colheita manual, de colheita mecanizada, visita técnica no parque industrial das duas linhas de produção disponíveis e entrevistas com o gerente industrial, com o supervisor de planejamento e controle da produção, com o coordenador de segurança do trabalho e com o coordenador de gestão agrícola. Finalmente, na usina D foi realizada uma visita técnica no parque industrial e entrevistas junto ao gerente industrial e junto ao gerente agrícola e

supervisor de qualidade agrícola. O Quadro 7 apresenta as informações sobre as usinas, fundamentais para o presente estudo, referente à fase quantitativa da pesquisa.

Quadro 7 - Informações do estudo de múltiplos casos

	LOCALIZAÇÃO	TAMANHO	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, supervisor de planejamento e controle da produção, coordenador de segurança do trabalho, coordenador de gestão agrícola.
Usina D	SP	Média	Ineficiente	Gerente industrial, gerente agrícola, supervisor de qualidade agrícola

As entrevistas foram realizadas de forma semi-estruturada, com a utilização de um computador pessoal, instrumentos de redação, papel e caneta. As entrevistas não foram gravadas em virtude dos interesses dos entrevistados que se sentiam mais a vontade sem a utilização do equipamento.

3.2.2.1.3. Questões do estudo de múltiplos casos

As questões do estudo do caso (APÊNDICE A) foram desenvolvidas com base nas variáveis que se mostraram relevantes para a eficiência operacional de usinas, no referencial teórico, conforme Quadro 8, e também a partir das entrevistas com especialistas.

Quadro 8 - Variáveis do referencial teórico relacionadas à eficiência operacional

Eficiência operacional	porcentagem de cana-de-açúcar queimada (RIBEIRO, 2008)
	variedade genética da cana-de-açúcar (SIQUEIRA; REIS, 2006)
	colheita manual versus colheita mecanizada (SIQUEIRA; REIS, 2006)
	teor de sacarose da cana-de-açúcar (SIQUEIRA; REIS, 2006)
	influência do solo sobre o plantio de cana (SMEETS ET AL., 2008)
	influência do clima sobre o plantio de cana (SMEETS ET AL., 2008)
	tecnologia de fabricação (COLIN, 2009)
	etapas do processo industrial (KRAJNC; GRAVIC, 2009)
	tecnologias utilizadas no processo produtivo (KRAJNC; GRAVIC, 2009)
	solo no estado de São Paulo (TORQUATRO; MARTINS; RAMOS, 2009)
	clima no estado de São Paulo (COLIN, 2009)
	infraestrutura no estado de São Paulo (MARTINELLI ET AL., 2009)

As questões foram elaboradas de forma a, inicialmente, explorar a eficiência operacional através da qualidade da cana-de-açúcar e do processo produtivo e, posteriormente, analisar como as variáveis tamanho e localização influenciam nas questões relativas à eficiência. Dessa forma, é possível relacionar indícios de aspectos das usinas que as tornam mais eficientes e, conseqüentemente, relacioná-los às variáveis tamanho e localização.

3.2.2.1.4. Guia para o relatório do estudo de caso

No relatório do estudo de caso procura-se fazer o uso de múltiplas fontes de evidência.

O relatório do estudo de caso deve abordar, em princípio, os aspectos que proporcionam uma maior eficiência operacional em usinas, do ponto de vista da qualidade da cana-de-açúcar e da eficiência do processo produtivo. Em seguida, depois de identificados os principais aspectos que sugerem possibilidades de maior eficiência operacional, esses foram relacionados com as variáveis tamanho e localização das usinas.

Finalmente, o relatório foi concluído com um quadro-resumo que, de acordo com Yin (2010), pode fazer a triangulação das múltiplas fontes de evidência dos resultados encontrados na pesquisa. Yin (2010, p. 142) afirma que “um importante ponto forte da coleta de dados do estudo de caso é a oportunidade de usar diferentes fontes de evidência”.

3.2.2.2. Técnica para análise dos resultados qualitativos

A análise de conteúdo foi utilizada como técnica de pesquisa para avaliar os resultados das entrevistas semi-estruturadas realizadas junto às usinas de cana-de-açúcar, no estudo de múltiplos casos na etapa qualitativa do estudo. De acordo com Bardin (2011, p. 37), “a análise de conteúdo é um conjunto de técnicas de análise das comunicações”. Para Richardson (2007, p. 223), “a análise de conteúdo é um conjunto de instrumentos metodológicos cada dia mais aperfeiçoados que se aplicam a discursos diversos”.

Em relação ao uso da técnica em pesquisa qualitativa, Bardin (2011, p. 32) afirma que “qualquer comunicação, isto é, qualquer transporte de significações de um emissor para um receptor controlado ou não por este, deveria poder ser escrito, decifrado, pelas técnicas de análise de conteúdo”.

Neste estudo, tem-se como objetivo analisar mensagens (entrevistas) elaboradas por múltiplas fontes, ou seja, por diversas usinas de cana-de-açúcar, sobre o mesmo tema.

Bardin (2011) destaca que a aplicação da análise de conteúdo é extremamente vasta, podendo ser empregada em qualquer comunicação na qual exista um transporte de significações de um emissor para um receptor. A Figura 26 apresenta um comparativo entre a leitura normal de uma comunicação e uma leitura através do uso das técnicas da análise de conteúdo.

Fonte: Bardin (2011)

Figura 26 – Análise de conteúdo na comunicação

A aplicação da análise de conteúdo acontece em três fases (BARDIN, 2011):

- a pré-análise;
- a exploração do material;
- o tratamento dos resultados, a inferência e a interpretação.

A pré-análise compreende a fase de organização propriamente dita, na qual as idéias iniciais são sistematizadas, de forma a conduzir um esquema preciso do desenvolvimento das operações sucessivas, em um plano de análise. Inicialmente, no que diz respeito à preparação do material, cada entrevista ou produção de um locutor é a unidade base de análise, na qual a preparação do material deve conduzir a transcrição exaustiva de cada produção, conservando o máximo possível de informação. A fase de exploração do material compreende a aplicação dos procedimentos sistemáticos planejados na etapa anterior e fornece informações e materiais para a realização da fase de interpretação dos dados. A análise desse material, seguindo as orientações de Bardin (2011), aconteceu inicialmente através da análise temática, desenvolvida a partir das variáveis extraídas da revisão bibliográfica e das entrevistas com

especialistas. Em seguida, cada entrevista é transcrita em sua totalidade organizada e singular. A Figura 27 apresenta as etapas desenvolvidas na aplicação da técnica.

Fonte: Adaptado de Bardin (2011)

Figura 27 – Etapas da análise de conteúdo

Para as fases de inferência e interpretação dos resultados em entrevistas, são propostos dois níveis de análise, em duas fases sucessivas ou imbricadas, na qual uma enriquece a outra. O primeiro nível consiste em um processo denominado decifração estrutural centrado em cada entrevista, no qual o pesquisador procura abstrair de si próprio e das entrevistas anteriores para procurar a compreensão a partir da fala do entrevistado, imergindo no mundo subjetivo do emissor e, simultaneamente, se preparando para o segundo nível, no qual realiza-se a transversalidade temática, verificando uma ordem lógica do pensamento e dos temas reincidentes e relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. Por isso, no presente estudo, primeiramente, são apresentadas as descrições das entrevistas realizadas e, posteriormente, análises transversais são desenvolvidas com o objetivo de estabelecer relacionamentos entre as variáveis de estudo através da análise comparativa no estudo de múltiplos casos.

4. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados do presente estudo. Inicialmente, os resultados da fase quantitativa da pesquisa e, posteriormente, os resultados do estudo de múltiplos casos, que compreende a fase qualitativa.

4.1. Resultados da pesquisa quantitativa

Os resultados da análise descritiva permitem uma análise detalhada das variáveis de *input* e de *output* do modelo DEA aplicado no presente estudo. Em seguida, são apresentados os resultados da técnica DEA propriamente dita e, então, esses resultados são relacionados com as variáveis tamanho e localização das usinas.

4.1.1 Análise descritiva dos resultados

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 3 os valores médios, mínimos, máximos e de variabilidade das variáveis estudadas nesta pesquisa.

Tabela 3 - Estatística descritiva

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance
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
Valid N (listwise)	355					

A partir da análise da Figura 28 fica evidente que a dispersão é maior para o grupo das usinas eficientes, que apresentam limites superiores maiores do que o grupo das usinas ineficientes.

Existem, no entanto, valores considerados *outliers* para as usinas classificadas como ineficientes, que possuem valores altos de moagem de cana-de-açúcar, ou até mesmo de produção de açúcar ou de etanol, mas que, apesar disso, não são classificadas como eficientes.

Figura 28 - Gráfico *BOX-PLOT* da variável de *input*

Para a produção de açúcar, na Figura 29, o primeiro quartil possui uma amplitude pequena para as usinas eficientes e um quartil ainda inferior para o grupo das usinas ineficientes, o que pode ser explicado pelo fato de muitas usinas de cana-de-açúcar no Brasil optarem por produzir exclusivamente etanol, não produzindo, portanto, nenhuma quantidade de açúcar. Para as usinas eficientes existe uma maior dispersão, desde usinas que produzem exclusivamente etanol até usinas que produzem quase 500.000 toneladas de açúcar por safra.

Figura 29 - Gráfico *BOX-PLOT* da variável de *output* açúcar

É possível verificar, na Figura 29, que os dois grupos apresentam valores muito próximos de mediana, no entanto, a dispersão para o grupo das usinas eficientes é maior, o que pode ser verificado a partir do terceiro e quarto quartil.

Figura 30 - Gráfico *BOX-PLOT* da variável de *output* etanol

Na Figura 31 e na Figura 32 são realizadas comparações da quantidade produzida de cada um dos *outputs* do modelo DEA aplicado, em relação à quantidade de cana-de-açúcar disponível para moagem, por DMU, que compõem a variável de *input* da pesquisa. A relação da quantidade produzida de açúcar a partir da quantidade disponível de cana-de-açúcar é apresentada na Figura 31, enquanto a relação entre a quantidade produzida de etanol a partir da cana-de-açúcar é apresentada na Figura 32.

Figura 31 - Gráfico de dispersão entre as variáveis moagem e açúcar

É importante observar, no entanto, que existem usinas que produzem exclusivamente açúcar e usinas que produzem apenas etanol. Por isso é possível verificar usinas que, embora apresentem quantidade de moagem elevadas, aparecem com valores produzidos de açúcar igual a zero, o que significa que essas usinas produzem exclusivamente o produto etanol.

Figura 32 - Gráfico de dispersão entre as variáveis moagem e etanol

Em relação às variáveis quantidade total de moagem de cana-de-açúcar, produção total de açúcar e de etanol, é possível analisar a variabilidade que existe dentro de um mesmo nível de insumos, ou para uma mesma quantidade de produção de açúcar ou de etanol. Essa diferença na capacidade de maior quantidade produzida, dada uma quantidade de insumos, ou na capacidade de produzir a mesma quantidade, com uma menor utilização de insumos, representa a eficiência operacional da usina de cana-de-açúcar.

No entanto, este estudo procura avaliar se as variáveis tamanho e localização das usinas têm influência sobre a eficiência operacional dessas. A Figura 33 apresenta a frequência de usinas localizadas no estado de São Paulo, ou localizadas em outras unidades da federação.

CLASSIFICAÇÃO LOCALIZAÇÃO

Figura 33 - Classificação por localização

O estado de São Paulo representa 47,9% do total de usinas no Brasil, as demais estão localizadas em outros estados, sobretudo em Alagoas, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Pernambuco e Mato Grosso do Sul.

A variável tamanho está representada na forma de frequência da população na Figura 34.

CLASSIFICAÇÃO TAMANHO

Figura 34 - Classificação por tamanho

Em relação ao tamanho das usinas de cana-de-açúcar no Brasil, de acordo com classificação da UNICA (2011), do total de 355 usinas, 132 são pequenas (37,2%), 163 são de médio porte (45,9%) e 60 são grandes usinas (16,9%).

4.1.2 Scores de eficiência

Para o conjunto das usinas de cana-de-açúcar da safra 2008/2009 foi analisada a relação entre o montante total de cana-de-açúcar disponível para ser processada e os valores totais de produção de açúcar e etanol, dessa forma as usinas foram avaliadas em relação à sua eficiência operacional.

Foi verificado que onze, das 355 usinas analisadas neste estudo, foram classificadas como eficientes, o que representa aproximadamente 3% da população total.

A Tabela 4 apresenta os valores de *input* e de *output* (em toneladas) das onze usinas eficientes de acordo com a aplicação da técnica DEA. Os valores de moagem representam o volume total de cana-de-açúcar processada, que constitui a variável de *input* do modelo. Os valores de açúcar e de etanol, em contrapartida, representam os valores produzidos ao longo da safra 2008/2009 e constituem as duas variáveis de *output* do modelo.

Tabela 4 - Usinas eficientes

Nome da usina	Estado	Tamanho	Moagem (ton)	Açúcar (ton)	Etanol (ton)	Score
Usina da Barra S/A						
Açúcar e Álcool da Barra	SP	Grande	7.378.408	499.772	315.804	100,00
Usina da Barra S/A						
Açúcar e Álcool de Bonfim	SP	Grande	4.785.973	371.412	193.029	100,00
Açúcar Guarani S/A	SP	Grande	4.436.982	459.022	78.592	100,00
Andrade Açúcar e Álcool S/A	SP	Grande	3.187.694	183.794	200.881	100,00
Usina de Açúcar Santa Terezinha Ltda. Ivaté	PR	Média	2.001.450	222.151	46.061	100,00
Aralco S/A Indústria e Comércio	SP	Pequena	833.436	106.57333	0	100,00
Companhia Brasileira de Açúcar e Álcool	SP	Pequena	405.029	59.212	0	100,00
Filial ICEM						
Usina São Martinho S/A	SP	Grande	8.004.221	445.903	411.991	100,00
Usina Santa Adélia S/A Filial Usina	SP	Média	2.151.099	0	184.880	100,00

Interlagos						
Laginha Agro Industrial S/A Matriz	AL	Pequena	630.349	0	72.752	100,00
Companhia Usina Bulhões	PE	Pequena	72.612	0	9.653	100,00

É possível observar que oito, das onze usinas consideradas eficientes, estão localizadas no estado de São Paulo, enquanto, em relação ao tamanho, de acordo com a classificação oficial de tamanho de usinas de cana-de-açúcar da UNICA (2011), existem cinco usinas grandes, duas usinas médias e quatro usinas pequenas.

Na Tabela 4 é possível verificar que o fato de uma usina utilizar toda a sua capacidade de moagem na produção exclusiva de açúcar, ou na produção exclusiva de etanol, não é um fator que, em princípio, influencia de forma direta na eficiência operacional. No grupo das usinas classificadas como eficientes, de acordo com o modelo utilizado nesta pesquisa, existem três usinas que produziram exclusivamente etanol e duas usinas que produziram exclusivamente açúcar, as demais têm como *output* os dois produtos.

É importante observar, no entanto, que a eficiência em DEA é sempre relativa, levando em consideração as DMUs que fazem parte do grupo de usinas analisadas na pesquisa.

4.1.3 Eficiência operacional e a variável localização

Considerando a importância do estado de São Paulo para a indústria canavieira no Brasil, a Tabela 5 apresenta as frequências de usinas eficientes em relação à frequência da população.

Tabela 5 - Frequências por localização

	usinas eficientes	população total
usinas localizadas no estado de SP	8 (73%)	170 (47,9%)
usinas localizadas em outros estados	3 (27%)	185 (52,1%)

Dentre as usinas de cana-de-açúcar eficientes operando no Brasil, um número significativo está localizado no estado de São Paulo. Embora haja muitas usinas ineficientes localizadas no estado de São Paulo, a proporção de usinas nesse estado é maior no grupo das usinas eficientes (73%), se comparada à proporção na população total de usinas (47,9%).

Portanto, a partir da proporção de usinas do estado de São Paulo verificada na população total, o resultado esperado para a proporção de usinas localizadas neste estado, no grupo de usinas classificadas como eficiente, seria de aproximadamente 47,9%. No entanto, foi verificado que no grupo das usinas eficientes existe uma proporção de usinas do estado de São Paulo no valor de 73%, significativamente maior do que o valor esperado.

4.1.4 Eficiência operacional e a variável tamanho

Além da variável localização, a variável tamanho também foi analisada sob a perspectiva do impacto na eficiência das usinas de cana-de-açúcar. A Tabela 6 apresenta as frequências verificadas para o grupo das usinas eficientes e para a população total em relação à variável tamanho.

Tabela 6 - Frequências por tamanho

	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%)

A partir das proporções verificadas na população total de usinas, esperava-se uma proporção, no grupo de usinas classificadas como eficientes, de 16,9% de usinas grandes, 45,9% de usinas médias e 37,2% de usinas pequenas, no entanto, foi verificada uma proporção de 45,5% de usinas grandes, 18,2% de usinas médias e 36,3% de usinas pequenas.

É possível afirmar, portanto, que existe uma maior proporção de usinas grandes dentre as usinas eficientes se comparada à proporção de usinas grande dentre a população total.

4.2. Resultados da pesquisa qualitativa

A seguir, são apresentados os resultados da fase qualitativa do presente estudo.

Na fase quantitativa foi verificado que, do ponto de vista da localização, existe uma proporção maior de usinas do estado de São Paulo no grupo das usinas eficientes, enquanto do ponto de vista da variável tamanho, existe uma proporção maior de usinas grandes no grupo das usinas eficientes. Este capítulo visa discutir os resultados que sugerem estas conclusões.

Inicialmente, procurou-se verificar quais os aspectos que possibilitam às usinas de cana-de-açúcar uma maior eficiência operacional para, posteriormente, analisar possíveis impactos das variáveis tamanho e localização sobre esses aspectos. A partir das entrevistas realizadas com os especialistas, foi possível verificar indícios de que a eficiência operacional pode estar relacionada a uma cana-de-açúcar com qualidade superior, o que possibilita uma maior extração do caldo e, conseqüentemente, uma maior produção de açúcar e etanol. A eficiência operacional pode também estar relacionada à utilização de maquinários e equipamentos de maior tecnologia na linha de produção e que possibilitam maior produtividade. A eficiência operacional, portanto, depende de duas variáveis preliminares, que foram identificadas a partir da revisão bibliográfica e das entrevistas não estruturadas com especialistas.

- variável A: qualidade da cana-de-açúcar
- variável B: eficiência operacional do processo produtivo

Inicialmente, portanto, procurou-se verificar, no estudo de múltiplos casos, aspectos que pudessem proporcionar impacto na eficiência operacional de acordo com as duas variáveis.

Como pode ser visto na Figura 35, busca-se no estudo de caso investigar como acontece a influência das variáveis 1 e 2 sobre as variáveis A e B, ou seja, de que maneira a qualidade da cana-de-açúcar e a eficiência do processo produtivo é influenciada pela localização e pelo tamanho das usinas. Procura-se verificar, portanto, se a variável localização influencia a qualidade da cana-de-açúcar (α) e/ou a eficiência do processo produtivo (β) e, também, se a variável tamanho influencia a qualidade da cana-de-açúcar (θ) e/ou na eficiência operacional do processo produtivo (Δ). As questões do estudo de múltiplos casos foram desenvolvidas para verificarem indícios da existência de tais relacionamentos.

Figura 35 – Análise do relacionamento entre as variáveis do estudo

4.2.1. Descrição esquemática do estudo de múltiplos casos

Como apresentado na metodologia do presente estudo, quatro usinas de cana-de-açúcar compõem o estudo de múltiplos casos desta pesquisa. As mesmas foram escolhidas por conveniência em função de sua representatividade e importância no setor.

4.2.1.1. Estudo de caso usina A

A usina A, conforme descrito no Quadro 9, é uma usina de cana-de-açúcar localizada no estado de São Paulo, é uma usina grande e eficiente de acordo com o modelo DEA aplicado nesta pesquisa.

Quadro 9 - Informações usina A

	localização	tamanho	classificação	score
usina A	SP	grande	eficiente	100,00

Aproximadamente 50% da cana-de-açúcar moída na usina A 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%, sendo que a usina A tem como objetivo que, até 2014, 100% da colheita seja realizada de forma manual, o que representa um projeto de longo prazo da organização de capacitação dos empregados.

Atualmente a usina A 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 A está localizada.

O entrevistado foi enfático ao dizer que a usina A é capaz de produzir uma cana-de-açúcar com um excelente teor de sacarose em virtude das condições climáticas da região e do solo fértil. Tais fatores, aliados ao manejo adequado da cultura e do uso da variedade adequada, possibilitam bons resultados no que diz respeito à qualidade da cana.

A própria usina A é responsável pela adubação do solo, sendo que, após uma análise prévia, os insumos são aplicados de acordo as necessidades do solo. Em virtude da quantidade de insumos adquiridos, é possível uma economia de escala.

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. Usinas localizadas em qualquer região são capazes de adquirir quaisquer tecnologias.

Na etapa de extração do caldo, a usina A 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, no entanto, a sua utilização permite uma redução de impurezas e, consequentemente, 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, 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 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 açúcar 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 e da facilidade de distribuição, mas é favorável, sobretudo, em função do clima e do solo.

4.2.1.2. Estudo de caso usina B

A usina B, conforme descrito no Quadro 10, é uma usina de cana-de-açúcar localizada no estado de Alagoas, é uma usina pequena e eficiente de acordo com o modelo DEA aplicado nesta pesquisa.

Quadro 10 - Informações usina B

	localização	tamanho	classificação	<i>score</i>
usina B	AL	pequena	eficiente	100,00

A usina B 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 exigências do solo, determinadas por análises realizadas pelo setor agrícola.

O processo produtivo do açúcar e do etanol é igual até a fase de tratamento do caldo. Em seguida há uma diferença nos processos. Para a produção do etanol, realiza-se a fermentação, centrifugação (separação da levedura do vinho) e, por fim, a destilação. Para a produção de açúcar, é realizada a evaporação, seguida do cozimento e cristalização, centrifugação e ensaque.

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 álcool, tem-se a fermentação contínua e destilação contínua.

Na usina B se produz, 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.

4.2.1.3. Estudo de caso usina C

A usina C, conforme descrito no Quadro 11, é uma usina de cana-de-açúcar localizada no estado de São Paulo, é uma usina média e ineficiente de acordo com o modelo DEA aplicado nesta pesquisa.

Quadro 11 - Informações usina C

	localização	tamanho	classificação	<i>score</i>
usina C	SP	média	ineficiente	91,27

A usina C não possui terras próprias. 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, essa poderia ser utilizada para a cogeração de energia.

São utilizadas várias variedades genéticas, que dependem do ambiente de produção, ou seja, das condições edafoclimáticas e de quando a cana-de-açúcar será colhida. A adubação é frequentemente realizada pela usina, no entanto, esta é realizada de acordo com especificações que são transmitidas de acordo com estudos da necessidade do solo.

A usina C possui duas linhas de produção. A primeira, mais nova, possui uma capacidade produtiva de 8000 toneladas por dia e equipamentos de tecnologia elevada. 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, capacidade de 5000 ton/dia, na qual a limpeza, ou lavagem, é realizada com água e tem como aspecto negativo a perda de parte do açúcar.

De acordo com o entrevistado, o acesso às tecnologias independe da localização, já que usinas localizadas em diferentes estados do país conseguem adquirir equipamentos de alta tecnologia de diversos fornecedores. 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.

4.2.1.4. Estudo de caso usina D

A usina D, conforme descrito no Quadro 12, está localizada no estado de São Paulo, é uma usina média e ineficiente de acordo com o modelo DEA aplicado nesta pesquisa.

Quadro 12 - Informações usina D

	localização	tamanho	classificação	<i>score</i>
usina D	SP	média	ineficiente	87,77

Do total de 58000 hectares de terra, 1000 hectares são de propriedade da usina, 35000 hectares são arrendados e 22000 são do tipo fornecimento.

As terras próprias tendem a apresentar um teor menor de sacarose porque nelas são plantadas variedades genéticas com colheita precoce ou tardia, para permitir que a linha de produção permaneça funcionando permanentemente. Existem, ainda, alguns terrenos irregulares, no entanto, 97% da colheita é realizada de forma mecanizada, a colheita é manual apenas em terrenos cuja declividade é superior a 21%. A queimada é realizada, portanto, apenas para a colheita realizada de forma 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 do solo, realizadas por agrônomos.

O processo produtivo independe da localização, o acesso a equipamentos e tecnologia pode ser obtido por usinas em qualquer lugar do país. No entanto, no estado de São Paulo tem-se uma mão de obra mais especializada, para assistência técnica, consertos etc.

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, com o objetivo de diminuir os custos.

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, é importante o investimento em aumento da produtividade.

Em relação à qualidade do solo, algumas regiões apresentam ambiente de produção A, de acordo com a classificação do CTC, mas existem também ambientes de produção D e E. O clima tropical é favorável ao cultivo da cultura, com adequada exposição ao sol e calor.

4.2.2. Resultados encontrados no estudo de múltiplos casos

O Quadro 13 apresenta os principais resultados encontrados a partir do estudo de múltiplos casos, no que diz respeito à qualidade da cana-de-açúcar (variável A), e a eficiência operacional do processo produtivo (variável B), para as quatro usinas estudadas.

Quadro 13 - Resultados encontrados no estudo de múltiplos casos

	localização	tamanho	classificação	score	variável A - qualidade da cana-de-açúcar	variável B - eficiência operacional do processo produtivo
Usina A	SP	grande	eficiente	100	Clima tropical; Latossolo roxo.	Colheita predominante mecanizada, utilização de moenda, SLCS, utilização de fermentação contínua, peneira molecular para recuperação do anidro, uso de filtro no tratamento do caldo.
Usina B	AL	pequena	eficiente	100	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	91,27	Clima tropical; latossolo acríco.	Colheita predominante mecanizada, utilização de moenda, limpeza da cana predominantemente com água, não utiliza demais equipamentos na produção.
Usina D	SP	média	ineficiente	87,77	Clima tropical; latossolo acríco.	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 revisão bibliográfica e, posteriormente, por meio das entrevistas com especialistas e no estudo de múltiplos casos realizados nas usinas, foi possível verificar a existência de indícios de que o solo e o clima, que juntos compõem os fatores edafoclimáticos da Figura 26, são aspectos importantes e determinantes, que impactam na variável A. Cesar et al. (1987) corroboram os resultados, ao afirmarem 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 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.

Em relação à variável B da Figura 26, que diz respeito à eficiência operacional do processo produtivo e leva em consideração a capacidade da usina de produzir uma maior quantidade de açúcar e/ou de etanol, também foram verificados indícios de algumas tecnologias que podem contribuir para um aumento da eficiência, como o SLCS e o filtro para tratamento do caldo.

Nas próximas subseções são discutidos os indícios da existência de possíveis impactos das variáveis tamanho e localização na qualidade da cana-de-açúcar e na eficiência operacional do processo produtivo, a partir do estudo dos múltiplos casos.

4.2.2.1. Influência da variável localização na eficiência operacional

A usina A e a usina B foram utilizadas como indícios de que os fatores clima e solo são relevantes, na medida em que as duas usinas classificadas como eficientes na fase quantitativa do trabalho estão localizadas em regiões cujos ambientes de produção são favoráveis.

Corroborando as afirmações de Smeets et al. (2009), Torquatro, Martins e Ramos (2009), e Martinelli et al. (2011), existem evidências de que o estado de São Paulo está localizado em uma região cujos fatores edafoclimáticos são favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar.

Conforme verificado na Figura 1, existe uma concentração de usinas localizadas na região nordeste do estado de São Paulo, que coincide com a localização da incidência de terra roxa, ou latossolo roxo (LR). De acordo com a Agência de Informação Embrapa (2012), a terra roxa compreende solos de grande importância agrícola e elevado potencial produtivo, respondem bem à aplicação de fertilizantes e corretivos, apresentam boa aptidão para lavouras e demais usos agropastoris. Segundo Ker (1997), os indícios positivos da agricultura nas áreas de domínio dos latossolos roxos (planalto rio-grandense, norte paranaense, áreas de São Paulo com destaque para região de Ribeirão Preto, sudoeste goiano, região de Dourado e Tangará da Serra), parece confirmar o grande potencial agrícola desse tipo de solo, pela sua fertilidade natural, facilidade e resposta à correção da fertilidade quando necessária e, ainda, pela possibilidade ampla de mecanização e de irrigação em alguns locais.

Corroborando tais afirmações, segundo SOBIOLOGIA (2012), a terra roxa é um solo que se destaca por sua fertilidade, aparece no território brasileiro nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul.

A usina A está localizada em uma região cujo solo predominante pode ser classificado como latossolo roxo, ou simplesmente terra roxa. A usina B, no entanto, está localizada em uma região cujo solo é classificado como latossolo vermelho-amarelo. Segundo Ker (1997), o latossolo vermelho-amarelo é aquele que possui a maior e mais ampla distribuição geográfica no Brasil, dentre os latossolos, e são muito variáveis quanto à fertilidade natural e são encontrados em áreas que variam do relevo plano (chapadões) ao montanhoso. Tanto a usina A, como a B, são classificadas como eficientes.

É importante observar que existem, no entanto, usinas localizadas no estado de São Paulo, que foram classificadas como ineficientes. Embora esse estado apresente regiões cujos fatores edafoclimáticos são favoráveis ao cultivo da cana, existem também regiões com ambientes de produção menos favoráveis, conforme verificado na usina D. Da mesma forma, condições propícias ao cultivo da cana-de-açúcar também podem ser encontradas em outros estados, conforme verificado na usina B.

4.2.2.2. Influência da variável tamanho na eficiência operacional

A partir das entrevistas realizadas, sobretudo do estudo de múltiplos casos na usinas A, C e D, foi possível fazer suposições de que, em virtude dos custos fixos elevados, inerentes às instalações de uma usina de cana-de-açúcar, os gestores procuram utilizar a máxima capacidade produtiva instalada, pois um aumento do volume processado pela usina significa um ganho financeiro elevado.

Foram verificados, no entanto, alguns equipamentos ou tecnologias que as usinas dispõem que podem proporcionar uma maior eficiência operacional. No entanto, foram encontrados indícios, a partir das entrevistas com especialistas e do estudo de múltiplos casos, sobretudo na usina C e na D, de que, financeiramente, é mais interessante o aumento da quantidade de cana-de-açúcar processada do que um aumento na produtividade de açúcar e etanol. Portanto, o estudo realizado sugere que, inicialmente, haja um maior investimento no aumento da capacidade de moagem de cana-de-açúcar, ou seja, um aumento no volume de cana-de-açúcar processado para, posteriormente, a realização de investimentos em equipamentos e tecnologias que permitam um incremento percentual na eficiência operacional. Sendo assim, o investimento em tecnologia seria uma alternativa às usinas, que não teriam mais como aumentar sua capacidade de moagem. Estas seriam consequentemente usinas de grande porte.

Esse resultado corrobora a afirmação de Romão Junior (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 SLCS e o filtro no tratamento do caldo.

No que diz respeito à variável B, sobre a eficiência operacional do processo produtivo, a queimada da cana-de-açúcar é um fator que se mostrou relevante para o estudo, na medida em que é capaz de eliminar a palha da cana, que dificulta a extração do caldo. Dessa forma, o método de colheita da cana-de-açúcar no campo tem consequências sobre a quantidade de palha (impureza vegetal) e de terra (impureza mineral) contida na cana no momento em que esta entra na linha de produção, o que pode influenciar na extração do caldo.

No entanto, a limpeza da cana-de-açúcar precede a fase de extração do caldo e tende a facilitar a extração deste pela moenda e/ou pelo difusor. No processo de limpeza da cana, existe a possibilidade do sistema de limpeza com água ou do SLCS, que diz respeito ao sistema de limpeza de cana a seco. Esta diminui a sílica e remove a palha da cana-de-açúcar, que, por sua vez, contribui para uma maior capacidade de extração do caldo da cana e evita o desperdício. A partir dos casos estudados, esta etapa se mostrou relevante na medida em que é capaz de influenciar na quantidade de impurezas misturadas no processo produtivo.

Corroborando o estudo de Ribeiro (2008), existem evidências de que a colheita manual é menos frequente no estado de São Paulo, no qual a cana é colhida com o auxílio de colheitadeiras, que expõem parte da palha sem a necessidade da queimada. Dessa forma o SLCS se mostrou uma tecnologia importante, capaz de permitir que a cana entre na esteira da linha de produção sem a interferência de impurezas vegetais e minerais que dificultam a ação da moenda ou do difusor. Neste aspecto, a escala foi verificada como um aspecto relevante no que diz respeito à eficiência operacional do processo produtivo, na medida em que uma maior escala viabiliza um investimento em equipamentos que proporcionam um melhor aproveitamento da tonelada de cana-de-açúcar que entra na esteira da linha de produção.

4.2.3. Triangulação dos resultados da pesquisa

Foram verificados nessa pesquisa, portanto, indícios de que a variável 1, localização, exerce impacto sobre a variável A, qualidade da cana-de-açúcar, enquanto a variável 2, tamanho da

usina, exerce impacto sobre a variável B, a eficiência operacional do processo produtivo, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Resultado do relacionamento entre variáveis

O Quadro 14 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 apresentados na Figura 36. 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 e, finalmente, a entrevista com o especialista que forneceu maiores indícios referentes aos resultados encontrados no estudo.

Existem indícios, portanto, a partir de múltiplas fontes de evidência utilizadas nesse estudo, de que, no estado de São Paulo, existe uma maior concentração de ambientes de produção favoráveis à extração da cana-de-açúcar com maior teor de sacarose e que possibilita um ganho em eficiência operacional. Também foram verificados indícios de que as usinas grandes possuem maiores motivações para a realização de investimentos em equipamentos e tecnologias que possibilitam um ganho em eficiência operacional dentro do processo de produção de açúcar e etanol, como o SLCS e o filtro para tratamento do caldo.

Quadro 14 – Triangulação dos resultados encontrados

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); 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); Empral (2012); Jacaré (2012); Romão Junior (2009).	Usinas A, B, C	Prof. Dr. UNESP Jaboticabal.
		Filtro para tratamento do caldo	Agência de Informação Embrapa (2012); REDETEC (2012).	Usinas A, B, C	Prof. Dr. UNESP Jaboticabal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscou-se, nesta pesquisa, analisar a relação entre as variáveis eficiência operacional, tamanho e localização de usinas de cana-de-açúcar. Dessa forma, foram coletados dados do anuário da cana-de-açúcar 2008/2009 relativos aos valores de moagem, produção de açúcar e de etanol, em toneladas, por usina e, através da técnica DEA, foram identificadas as usinas eficientes. Em seguida, por meio da realização de um estudo de múltiplos casos e da entrevista com especialistas, foram verificadas evidências de que o tamanho e a localização das usinas são determinantes na eficiência operacional.

5.1. Conclusões

A partir das evidências do estudo, é possível levantar suposições que levam à conclusão de que, no grupo das usinas eficientes, existe uma maior concentração de usinas localizadas no estado de São Paulo, no que diz respeito à variável localização, e uma maior concentração de usinas cujo tamanho é classificado como grande, no que diz respeito à variável tamanho.

No que se refere à variável localização, os resultados encontrados sugerem que, no estado de São Paulo, o solo e o clima, ou seja, os fatores edafoclimáticos predominantes, contribuem para uma cana-de-açúcar de maior qualidade, com nível mais elevado de sacarose, que proporciona uma maior eficiência operacional e, conseqüentemente, a uma maior produção de açúcar e etanol com o mesmo volume de cana-de-açúcar.

É importante destacar que, 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, fato que pode justificar a existência de usinas eficientes fora do estado de São Paulo, como é o caso da usina B, classificada como eficiente, está em Alagoas, em uma região cujos fatores edafoclimáticos são favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar.

No que se refere à variável tamanho, existem indícios de que as usinas grandes tenham maiores motivações para investir em equipamentos tecnológicos que proporcionam um processo produtivo mais eficiente. Duas tecnologias que apresentaram indícios de que exercem uma influência importante na eficiência operacional foram o SLCS e o filtro para tratamento do caldo. A realização do SLCS e a utilização de filtro para tratamento do caldo são tecnologias que poderiam proporcionar uma maior eficiência operacional 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. A Figura 37 apresenta, portanto, o modelo lógico dos resultados que levaram às conclusões da pesquisa.

Figura 37 - Modelo lógico dos resultados verificados

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.

5.2. Limitações do estudo

Como limitação do estudo realizado, temos o fato de que os resultados verificados dizem respeito exclusivamente à safra 2008/2009. Ainda, o modelo DEA aplicado utiliza um número restrito de variáveis, em virtude de limitações na base de dados.

Finalmente, houve limitações em virtude do acesso ao número de usinas cana-de-açúcar dispostas a participar da pesquisa na fase qualitativa.

5.3. Recomendações para trabalhos futuros

A pesquisa realizada permitiu, no entanto, 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 neste estudo, possibilitando a aplicação do modelo DEA com um número maior de variáveis.

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.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 22 ago. 2012.
- ALLEN, R.; THANASSOULIS, E. Improving envelopment in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 154, p. 363-379, 2004.
- 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.
- ANDRADE, M. M. **Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação: noções práticas**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- ANDRADE, S. J.; CRISTALE, J. C.; SILVA, F. S.; ZOCCOLO, G. J.; MARCHI, M. R. R. Contribution of sugar-cane harvesting season to atmospheric contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Araraquara city, Southeast Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 44, p. 2913-2919, 2010.
- ÂNGULO MEZA L.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G; FERNANDES, A. J. S. Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica. **Investigação Operacional**, v. 27, n. 1, p. 21-36, 2007.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 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 e Produção**, v. 15, p. 89-100, 2008.
- CAMARGO, A. M. P.; CASER, D. V.; CAMARGO, F. P.; OLIVETTE, M. P. A.; SACHS, R. C. C.; TORQUATO, S. A. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias. **Informações Econômicas**, v. 38, n. 3, p. 47-61, 2008.
- CAMPELLO, C. A. G. B. 2003. 216 f. **Eficiência Municipal**: um estudo no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA - CTC. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/>>. Acesso em: 12 abr. 2012.
- 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**, 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**, 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.

CONTRERAS, A. M.; ROSA, E.; PÉREZ, M.; LANGENHOVE, H. V.; DEWULF, J. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 772-779, 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.

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**, 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**, v.3, 2011.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Disponível em: <<http://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 15 mai. 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**, v. 48, p. 2978-2987, 2007.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, 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.

FREITAS, L. C.; KANEKO, S. Ethanol demand in Brazil: regional approach. **Energy Policy**, v. 39, p. 2289-2298, 2011.

GALLAGHER, P.W.; BRUBAKER, H.; SHAPOURI, H. Plant size: Capital cost relationships in the dry mill ethanol industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 565-571, 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, p. 2086-2097, 2008.

GRUPO FARIAS. Disponível em http://www.grupofarias.com.br/fluxograma_industrial.htm/. Acesso em 14 ago. 2011.

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.

INGARAMO, A.; HELUANE, H.; CESCO, M. Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 487-495, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 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.

JANK, M. S.; LEME, M. F. P.; NASSAR, A. M.; FAVARET FILHO, P. Concentration and internationalization of Brazilian agribusiness exporters. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 2, p. 359-374, 2001.

KASSAI, J. C. S. 2009. 318 f. **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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

KRAJNC, D.; GLAVIC, P. Assessment of different strategies for the co-production of bioethanol and beet sugar. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 87, p. 1217-1231, 2009.

LEBOREIRO, J.; HILAY, A. K. Biomass transportation model and optimum plant size for the production of ethanol. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 2712-2723, 2011.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V.; CORTEZ, L. A. B.; GRIFFIN, W. M.; SCANDIFFIO, M. I. G. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v. 34, p. 655-661, 2009.

LEPSCH, I. F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção**, p. 83-98, 1987.

LOVELL, C. A. K. **Production frontiers and productive efficiency**. In: the measurement of productive efficiency: techniques and applications. New York: Oxford University Press, 1993.

MAHADEVAN, R. The high price of sweetness: the twin challenges of efficiency and soil erosion in Fiji's sugar industry. **Ecological Economics**, v. 66, p. 468-477, 2008.

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**, 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**, 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**, v. 36, p. 3675-3690, 2011.

MOREIRA, D. R.; SANT'ANNA, A. P. Análise de eficiência em tratamentos cirúrgicos em período de mudança tecnológica. **Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção**, v. 10, n. 6, 2010.

NAZATO, C.; SILVA, D. F. C.; FERRAZ, S. C. U.; HARDER, M. N. C. Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto. **Bioenergia em revista**, v. 1, p. 129-139, 2011.

NETAFIM'S AGRICULTURE DEPARTMENT. Disponível em: <http://www.sugarcane crops.com/p/soil_requirement/>. Acesso em: 18 ago. 2012.

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

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. **Gestão e Produção**, v. 14, p. 25-41, 2007.

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

PERRIN, R. K.; FRETES, N. F.; SESMERO, J. P. Efficiency in Midwest US corn ethanol plants: a plant survey. **Energy Policy**, v. 37, p. 1309-1316, 2009.

PIMENTEL, J. C. S. 2009. 226 f. **Eficiência Tributária: um estudo do desempenho das regiões fiscais da Receita Federal do Brasil na arrecadação de imposto de renda entre 1995 e 2006**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEA-RP), Ribeirão Preto, 2009.

PORTAL BRASIL. Disponível em: <http://www.portalbrasil.net/brasil_solo.htm/>. Acesso em: 18 ago. 2012.

RAUPP, F. M.; BEUREN, I. M. **Metodologia da pesquisa aplicável às ciências sociais**. São Paulo: Atlas, 2003.

REDE DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DO RIO DE JANEIRO - REDETEC. Disponível em: <<http://www.redetec.org.br/inventabrasil/vacpres.htm/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana: efeitos à saúde respiratória. **Revista Saúde Pública**, v. 42, n. 2, p. 370-376, 2008.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social: métodos e técnicas**. Colaboradores José Augusto et al. 3. ed. 7. reimpr. São Paulo: Atlas, 2007.

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**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

SALGADO JUNIOR, A. P.; BONACIM, C. A. G.; PACAGNCCA JUNIOR, A. C. Aplicação da análise envoltória de dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste de São Paulo. **Organizações Rurais e Agroindustriais/Rural**, v. 11, n. 3, p. 494-513, 2009.

SENGUPTA, J. **Dynamic and stochastic efficiency analysis: economics of data envelopment analysis**. Singapore: World Scientific, 2000.

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

SIQUEIRA, P. H. L.; REIS, B. S. Determinantes de competitividade da agroindústria processadora de cana-de-açúcar no triângulo mineiro e no alto Parnaíba. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 202-215, 2006.

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

SOBIOLOGIA. Disponível em: <<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Solo/Solo8.php/>>. Acesso em: 19 ago. 2012.

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.

THANASSOULIS, E. **Introduction to the theory and application of data envelopment analysis: a foundation text with integrated software**. New York: Springer Science and Business Media, 2001.

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**, v. 39, n. 5, 2009.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. Disponível em:
<<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em 30 nov. 2011.

WOJTCZAK, M.; BIERNASIAK, J.; PAPIEWSKA, A. Evaluation of microbiological purity of raw and refined white cane sugar. **Food Control**, v. 25, p. 136-139, 2012.

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

APÊNDICE A - ROTEIRO DE QUESTÕES DO ESTUDO DE CASO

Roteiro da pesquisa semi-estruturada realizada junto aos gestores das usinas de cana-de-açúcar, aplicada no estudo de múltiplos casos, na etapa qualitativa da pesquisa.

USINA:

CARGO: _____

variável A: Qualidade da cana-de-açúcar.
1. Quais os fatores podem proporcionar uma cana-de-açúcar com um maior teor de sacarose aparente?
2. Qual a porcentagem de cana-de-açúcar própria da usina?
3. Qual a porcentagem da colheita que é realizada de forma manual?
4. Qual a porcentagem da cana-de-açúcar que é queimada antes da colheita?
5. Como é determinada a variedade genética da cana-de-açúcar utilizada na usina?
6. Como é a qualidade do solo na região da usina? E o clima? Este pode ser considerado um fator de diferenciação para a usina?

variável B: Eficiência operacional do processo produtivo
1. Quais as principais etapas do processo produtivo da usina?
2. Como é realizada a etapa de limpeza da cana-de-açúcar? Qual a tecnologia utilizada? SLCS?
3. Para a extração do caldo da cana-de-açúcar é utilizado difusor ou moenda?
4. É utilizado algum tipo de filtro no processo de tratamento do caldo?
5. A fermentação é realizada de forma contínua ou batelada?
6. A usina produz açúcar, etanol ou os dois produtos?
7. Como é decidido que quantidade produzir de cada mercadoria?

variável 1: A influência da variável localização na eficiência operacional
1. Qual a capacidade de moagem da usina, em toneladas de cana-de-açúcar?
2. Existe economia de escala? Como isso acontece?
3. O ganho de escala na compra de adubos/matérias-primas pode refletir em ganho de produtividade (em termos de maior sacarose na cana-de-açúcar)?
4. É interessante para a usina operar com maior escala? Por quê?
5. Melhores tecnologias estão relacionadas com maior escala?
6. A usina faz uso de algum outro equipamento ao longo do processo produtivo que pode ser capaz de aumentar a sua eficiência operacional?

variável 2: A influência da variável tamanho na eficiência operacional
1. A usina faz uso de toda a sua capacidade produtiva?
2. O solo poderia possibilitar uma cana-de-açúcar com maior ATR?
3. A localização da usina representa uma vantagem competitiva?
4. Usinas de SP possuem maior acesso a mão-de-obra qualificada? E maior acesso a maquinários de alta tecnologia?
5. A infraestrutura da região é adequada para o setor sucroalcooleiro?