

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMARA FERREIRA DIAS

OTIMIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE TRATORES TRANSBORDOS NA COLHEITA
DE CANA-DE-AÇÚCAR

JANDAIA DO SUL

2021

SAMARA FERREIRA DIAS

OTIMIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO DE TRATORES TRANSBORDOS NA COLHEITA
DE CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, Campus Avançado de Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção .

Orientador: Prof. Dr. Landir Saviniec.

JANDAIA DO SUL

2021

D541o Dias, Samara Ferreira
Otimização do deslocamento dos tratores transbordos na colheita de
cana-de-açúcar / Samara Ferreira Dias. - Jandaia do Sul, 2021.
55 f.

Orientador: Prof. Dr. Landir Saviniec
Trabalho de Conclusão do Curso (graduação) – Universidade Federal do
Paraná. Campus Jandaia do Sul. Graduação em Engenharia de Produção.

1. Logística. 2. Pesquisa operacional. 3. Cana-de-açúcar. 4. Trator
transbordo. I. Saviniec, Landir. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD: 658.78

*Dedico este trabalho a Deus,
Ele sempre cumpre todas as suas promessas,
e está presente em todos os momentos da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudo.

À minha família, pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas conquistas.

Ao meu orientador, Professor Dr. Landir Saviniec, pela paciência, tempo dispendido e contribuições dadas a esta pesquisa.

Ao Professor Dr. William Rodrigues dos Santos, por ter proposto e me dado a oportunidade de fazer parte de um projeto de iniciação científica com foco em simulação e otimização na colheita de cana-de-açúcar. A continuidade deste projeto de IC deu origem a este trabalho de conclusão de curso.

À Professora Dra. Helenice de Oliveira Florentino, pelas sugestões e contribuições dadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Curso de Engenharia de Produção, à Universidade Federal do Paraná, e a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória, por todo o conhecimento, recursos e apoio oferecido.

*“Tudo deveria se tornar o mais simples possível,
mas não simplificado.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

O cultivo de cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol representa uma importante fatia do agronegócio brasileiro. Embora importante, sua produção é um processo caro. Em particular, a logística de colheita e transporte da cana, dos canaviais até a usina, representa 40% a 60% dos custos de produção. Deste modo, torna-se importante a adoção de métodos que otimizem este processo logístico. Neste sentido, este trabalho aborda um problema de otimização logística que ocorre na colheita mecanizada, dentro dos canaviais, durante as etapas de corte e carregamento da cana-de-açúcar. Durante a colheita, a colhedora segue as linhas de cana, cortando, triturando e lançando os colmos da cana-de-açúcar dentro de uma caçamba rebocada por um trator (trator transbordo). Após percorrer uma dada distância sobre as linhas, a caçamba enche (ponto de carga) e o trator se desloca até pontos fora do talhão (ponto de transbordo), para transferir a carga para caminhões maiores, que fazem o transporte até a usina. Em um canavial pode haver vários pontos de transbordo, caso os caminhões sejam mal posicionados nesses pontos, pode acarretar em um reboque de cargas ineficiente, fazendo os tratores percorrerem maiores distâncias. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de programação linear inteira, cuja solução é capaz de definir o posicionamento correto dos caminhões, de forma a minimizar o deslocamento no reboque das cargas. Para validar o estudo, foi utilizada uma situação baseada em dados reais de um canavial pertencente a uma cooperativa agroindustrial localizada na região do Vale do Ivaí, no Município de Bom Sucesso, Estado do Paraná. Como resultado geral, o modelo proposto conseguiu-se reduzir o deslocamento dos tratores em torno de 20% quando comparado com a estratégia de colheita adotada pela cooperativa em estudo.

Palavras-chaves: Logística. Pesquisa Operacional. Cana-de-açúcar. Trator Transbordo.

ABSTRACT

The sugarcane farming to produce sucrose and ethanol represents an important part of the Brazilian agribusiness industry. Although important, the sugarcane farming is expensive. In particular, the logistics to harvest and transport the sugarcane from farms to mills represents 40% to 60% of the production costs. Therefore, it is important to employ methods to optimize the harvest logistics. In this sense, this project addresses the problem of optimizing the logistics occurring during the harvest, in the stage of cutting and loading the trucks. During the harvest, the sugarcane harvester follows the sugarcane lines, cutting, slicing and throwing the sugarcane strips into a wagon pulled by a tractor (transshipment tractor). After covering a given distance over the lines, the wagon fills (load point) and the tractor moves to points outside the field (transfer point), to transfer the load to trucks that transport the sugarcane to the processing plant. In a sugarcane field there can be several transfer points, if the trucks are parked randomly in these points, it can result in an inefficient carrying of loads, causing the tractors to travel greater distances. Therefore, in this research we have proposed a integer linear programming model to decide the correct points to park trucks, such that the total distance travelled by the tractors is minimized during the sugarcane harvest. To validate the proposed method, we used a case study based on real data from a farm belonging to an agro-industrial sugarcane cooperative located in the Vale do Ivaí region, in the municipality of Bom Sucesso, State of Paraná. As a general result, the proposed model reduced around 20% of the distance travelled by the tractors, during the harvest, when compared to the strategy employed by the cooperative under study.

Key-words: Logistics. Operational Research. Sugarcane. Transshipment Tractor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CADEIA PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR.	19
FIGURA 2 – USINAS E DESTILARIAS DO PARANÁ.	20
FIGURA 3 – HISTÓRICO DA PRODUÇÃO	21
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ALGUNS CANAVIAIS DA COOPERATIVA CE.	23
FIGURA 5 – PROCESSO DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR.	24
FIGURA 6 – TIPOS DE COLHEITA.	24
FIGURA 7 – CORTE MANUAL.	25
FIGURA 8 – CORTE COM CORTADEIRA.	25
FIGURA 9 – CORTE COM COLHEDORA.	26
FIGURA 10 – CARREGAMENTO COM MÁQUINA CARREGADEIRA.	26
FIGURA 11 – TRANSBORDO DA CARGA DOS TRATORES PARA OS CAMINHÕES.	27
FIGURA 12 – PROCESSO DE CORTE, TRANSPORTE E TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA COOPERATIVA.	28
FIGURA 13 – FLUXO DE OPERAÇÕES NO CTT DA COOPERATIVA.	28
FIGURA 14 – ETAPAS DE UM ESTUDO DE PO.	30
FIGURA 15 – MÉTODO HEURÍSTICO PROPOSTO.	33
FIGURA 16 – EXIBIÇÃO DAS LINHAS DE CANA COMO GRAFO.	35
FIGURA 17 – FLUXO METODOLÓGICO.	37
FIGURA 18 – TALHÃO COM PONTOS DE TRANSBORDO EM LOCAIS ADEQUADOS.	38
FIGURA 19 – DETALHE DAS LINHAS DE PLANTIO DA CANA-DE-AÇÚCAR.	39
FIGURA 20 – PONTOS DE CARGA ESTIMADOS COM BASE NA PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 500 METROS.	39
FIGURA 21 – CAMINHÃO ROMEU-E-JULIETA.	40
FIGURA 22 – PONTOS DE CARGA ESTIMADOS A CADA 1000 METROS.	43
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DO GRAFO QUE DESCREVE O DESLOCAMENTO DOS TRATORES.	44
FIGURA 24 – ILUSTRAÇÃO DO GRAFO SIMPLIFICADO.	44
FIGURA 25 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 1.	48
FIGURA 26 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 2.	49
FIGURA 27 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 3.	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – HISTÓRICO DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR ENTRE 1990 E 2011 NO PARANÁ.	22
TABELA 2 – NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO.	41
TABELA 3 – REPRESENTAÇÃO DA MATRIZ DE DISTÂNCIAS DO MODELO.	45
TABELA 4 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 1.	46
TABELA 5 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 1 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRATICADA PELA COOPERATIVA CE.	47
TABELA 6 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 2.	48
TABELA 7 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 2 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRATICADA PELA COOPERATIVA CE.	49
TABELA 8 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 3.	50
TABELA 9 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 3 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRATICADA PELA COOPERATIVA CE.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ALCOPAR	Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná
CE	Cooperativa em Estudo
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
CTT	Corte, Transporte e Transbordo
FC	Frente de Corte
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PIM	Programação Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
PPRC	Problema do Planejamento da Rota da Colhedora
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	LIMITAÇÕES	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	A CADEIA PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR	18
2.2	HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ.	19
2.3	A LOGÍSTICA DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR	22
2.3.1	Tipos de colheita	24
2.3.2	O corte, transporte e transbordo na colheita mecanizada	27
2.4	O SISTEMA QGIS	29
2.5	A PESQUISA OPERACIONAL PARA TOMADA DE DECISÃO	29
2.5.1	Métodos heurísticos	30
2.6	ESTUDOS SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR	32
2.6.1	Modelo matemático para o plantio e colheita da cana-de-açúcar	32
2.6.2	Programação das frentes de colheita visando o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte	33
2.6.3	Otimização da rota da colhedora na colheita mecanizada	34
2.6.4	Otimização do transporte da cana-de-açúcar por caminhões	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	36
3.2	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	37
4	O PROBLEMA DE DESLOCAMENTO DE TRATORES TRANSBORDO	38
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	38
4.2	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	40
5	MÉTODO PROPOSTO	41
5.1	MODELO MATEMÁTICO	41
5.2	MATRIZ DE DISTÂNCIAS	42
5.2.1	Estimação dos pontos de carga	42
5.2.2	Construção do grafo de deslocamentos	43

		13
5.2.3	Geração da matriz de distâncias para o modelo proposto	45
6	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	46
6.1	CENÁRIO 1: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 250 M	46
6.2	CENÁRIO 2: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 500 M	48
6.3	CENÁRIO 3: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 1000 M . . .	50
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar está entre as principais culturas economicamente importantes na economia brasileira, sendo utilizada principalmente para produção de açúcar e etanol. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2009) mostram que houve um aumento expressivo no cultivo desta planta no Brasil entre 1932 e 2005. São vários os fatores que favoreceram o cultivo. Dentre eles, a existência de solo fértil, clima propício ao plantio, e também o fato de o açúcar ser uma mercadoria com alta demanda no comércio internacional (CASTRO et al., 2007).

As crises do petróleo de 1973 e do açúcar de 1975 levaram os usineiros a reivindicarem benefícios do Governo Federal para melhorias do setor agrícola e implementação de uma cultura bioenergética no país. Isto contribuiu para o Brasil assumir uma postura de destaque na produção de biocombustíveis, impulsionando a criação de veículos bicompostíveis e, conseqüentemente, causando uma expansão do setor sucroalcooleiro (CASTRO et al., 2007).

Devido a elevação de preço do petróleo na crise de 1973, houve um aumento na demanda por combustíveis alternativos. O que exigiu do setor sucroalcooleiro uma maior produção de etanol e, conseqüentemente, aumento de eficiência na produção da cana-de-açúcar. Com base nisso, o estudo de métodos que otimizem o plantio, e a colheita da cana-de-açúcar, propiciando reduções de custo operacionais, se torna importante e impacta diretamente o custo de produção (GOES; MARRA; SILVA, 2008).

Entretanto, a otimização de recursos no setor sucroalcooleiro brasileiro ainda tem sido pouco explorada cientificamente. Deste modo, ao se considerar as várias etapas da produção da cana-de-açúcar, começando pelo plantio, passando pela colheita, carregamento, transporte, até seu processamento nas usinas, existe uma gama de processos aos quais se pode aplicar métodos computacionais para otimizar o uso de recursos, visando reduzir custos operacionais (GOES; MARRA; SILVA, 2008).

Os métodos de otimização podem ser bastante úteis para auxiliarem na logística de colheita da cana-de-açúcar. Neste trabalho, abordou-se um problema de logística encontrado durante a fase de colheita mecanizada da cana-de-açúcar dentro dos canaviais. Durante a colheita mecanizada, uma colhedora segue as linhas de cana dos talhões, cortando, picando e lançando os colmos em uma caçamba rebocada por um trator (denominado por trator transbordo) que acompanha a colhedora durante a colheita. Quando o transbordo atual completa sua carga, outro transbordo entra no lugar e o transbordo atual se desloca de dentro do talhão, do ponto que está (ponto de carga), até um ponto fora do talhão (ponto de transbordo), para efetuar a transferência da carga para caminhões de maior capacidade. Após transbordar a carga, o trator retorna para

a colhedora novamente. Ao completar carga, os caminhões se deslocam do canavial para um centro do processamento (usina ou destilaria), onde a cana é descarregada e processada. Depois de descarregar na usina, os caminhões retornam ao canavial novamente, e o processo continua. Neste contexto, o problema abordado consiste em designar os caminhões que chegam ao canavial, para estacionarem em pontos de transbordo estratégicos, de forma a minimizar o deslocamento que os tratores fazem dos pontos de carga até os pontos de transbordo. Para resolver o problema, foi proposto um modelo matemático baseado na formulação clássica do problema de localização de facilidades. Para validar o método proposto, foi utilizada uma situação baseada em dados reais de um canavial pertencente a uma Cooperativa agroindustrial localizada no Município de Bom Sucesso, Estado do Paraná. Como não temos autorização para citar o nome da cooperativa, no restante do texto ela será identificada por Cooperativa em Estudo (CE).

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo do trabalho é desenvolver um modelo que minimize o deslocamento que os tratores fazem dos pontos de carga até os pontos de transbordo, para aumentar a produtividade.

Os objetivos específicos são:

- Definir planos de colheita sistematizados e otimizados a partir do *layout* do canavial.
- Reduzir o consumo de combustíveis.
- Reduzir o desgaste dos maquinários.

1.2 JUSTIFICATIVA

O plantio, colheita, carregamento e transporte da cana-de-açúcar representa cerca de 40% a 60% do custo de produção do açúcar e do etanol (FLORENTINO et al., 2016; CARDOZO; SENTELHAS, 2013; RAMESCH; MAHADEVASWAMY, 2000). Em muitas usinas, um percentual desse custo é gerado pela falta de um plano de logística bem estruturado. Vários são os fatores, como por exemplo o planejamento realizado de forma empírica, desconhecimento das melhores tecnologias para otimização de rotas, falta de recursos financeiros para investimento em bons *softwares* de auxílio à tomada de decisão, e entre outros.

O planejamento de rotas que minimizam o tempo de colheita e reduzem os custos operacionais tem sido um tema pouco estudado na literatura, e também pouco

difundido fora do âmbito acadêmico. Neste sentido, este trabalho visa contribuir para o avanço do conhecimento científico neste tema, e espera-se que ele sirva como base para a realização de trabalhos posteriores.

No contexto da colheita de cana mecanizada realizada pela cooperativa CE, foi observado, a partir de visitas de campo, que não há um posicionamento dinâmico dos caminhões, em diferentes pontos de transbordo, visando minimizar o deslocamento dos tratores que rebocam as cargas. Atualmente, fixa-se um único ponto de transbordo e toda carga é enviada para ser transferida para os caminhões naquele ponto. Motivado por este fato, este estudo visa responder se é possível otimizar a logística praticada pela Cooperativa atualmente. Para isto, pretende-se averiguar se um plano de posicionamento dinâmico dos caminhões, em diferentes pontos de transbordo, resultaria em uma logística com redução de deslocamentos.

1.3 LIMITAÇÕES

Uma variável que influencia diretamente no consumo de combustível e desgaste dos tratores é o relevo do terreno. Isto é, o reboque de cargas em aclives consome mais combustível e proporciona maior desgaste dos maquinários, que em declives ou terrenos planos. Entretanto, por dificuldades de obter modelos digitais de terreno, considerou-se neste trabalho somente distâncias planas. Haja visto que tais informações, quando disponíveis, poderão ser incorporadas aos dados de entrada, sem perda de generalização. Além disso, para não tornar o estudo muito complexo e mantê-lo factível de ser executado como um TCC, considerou-se o processo de colheita sendo realizado por apenas uma colhedora e um trator transbordo. Entretanto, os processos de colheita geralmente empregam mais de uma colhedora e um trator transbordo em operação.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de estudos e conceitos relacionados à logística de colheita da cana-de-açúcar, os quais deram suporte ao desenvolvimento deste trabalho. O capítulo revisa as principais etapas da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, o histórico da produção de cana no Estado do Paraná, as principais etapas que compõem a colheita, métodos de Pesquisa Operacional e geoprocessamento que podem auxiliar nas operações de campo, e trabalhos acadêmicos com foco na otimização da logística canavieira. Além disso, são definidos os conceitos de *pontos de carga* e *pontos de transbordo*, que são essenciais para a compreensão do problema em estudo.

O Capítulo 3, classifica a pesquisa de acordo com a metodologia científica, e

caracteriza a empresa estudada.

O Capítulo 4 define o problema de logística abordado no trabalho.

O Capítulo 5 descreve o método proposto para resolver o problema formulado no Capítulo 4.

O Capítulo 6 apresenta os experimentos e resultados obtidos com o estudo de caso proposto, usando dados reais da cooperativa CE.

O Capítulo 7 conclui o trabalho, listando possíveis contribuições obtidas por este estudo quando comparado com a logística praticada pela Cooperativa CE atualmente. Além disso, são identificadas possíveis extensões deste trabalho.

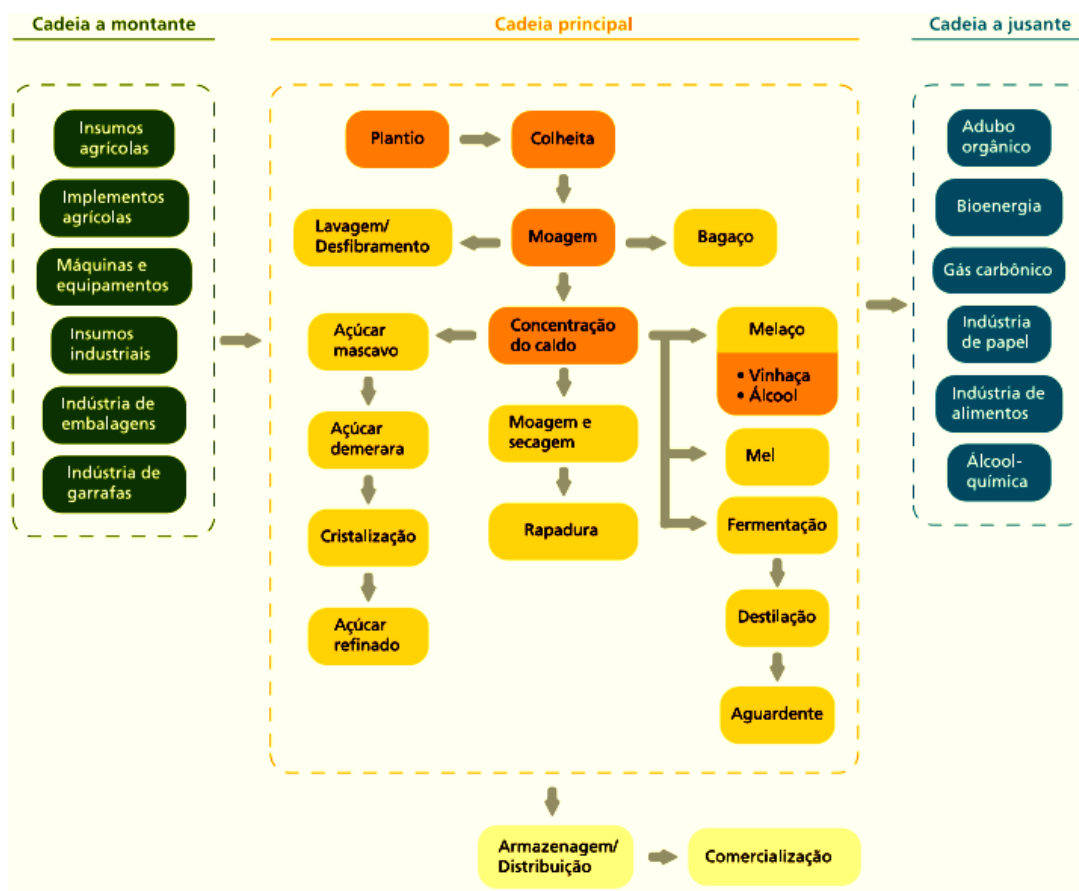
2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão dos conceitos utilizados ao longo deste trabalho, tais como a cadeia produtiva da cana-de-açúcar; o histórico de produção ao longo dos anos do açúcar e etanol, a logística canavieira, métodos de Pesquisa Operacional, geoprocessamento e alguns trabalhos acadêmicos voltados para a logística canavieira.

2.1 A CADEIA PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cadeia produtiva do setor sucroenergético brasileiro se caracteriza por um conjunto amplo e articulado de atividades. Ela começa com o cultivo da cana-de-açúcar e se encerra com a produção de vários produtos, sendo os principais deles: o açúcar e o álcool (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2008). Em maiores detalhes, conforme mostrado na FIGURA 1, o processo começa com o plantio da cana. Após a colheita, a cana é moída, gerando o caldo. O caldo, quando processado, gera vários produtos e subprodutos, como: álcool, melado, aguardente, rapadura, e vários tipos de açúcar.

FIGURA 1 – CADEIA PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR.



FONTE: VIDAL, SANTOS e SANTOS (2008).

Neste processo produtivo, resíduos, como a palha e o bagaço, são usados para gerar eletricidade e abastecer as próprias usinas. Além desses dois resíduos, durante o processo de produção do álcool gera-se um outro resíduo, chamado vinhaça, que é armazenado em lagoas de estabilização. Esse resíduo era um problema para muitas destilarias, mas com a evolução da tecnologia, nos últimos anos a vinhaça vem sendo tratada e utilizada na fertilização dos canaviais (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2008). Ainda em relação a produção do álcool, o processo passa por várias etapas. Na primeira é obtida a aguardente ou álcool cru, na segunda o álcool hidratado, na terceira o álcool anidro, e na quarta o álcool neutro (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2008).

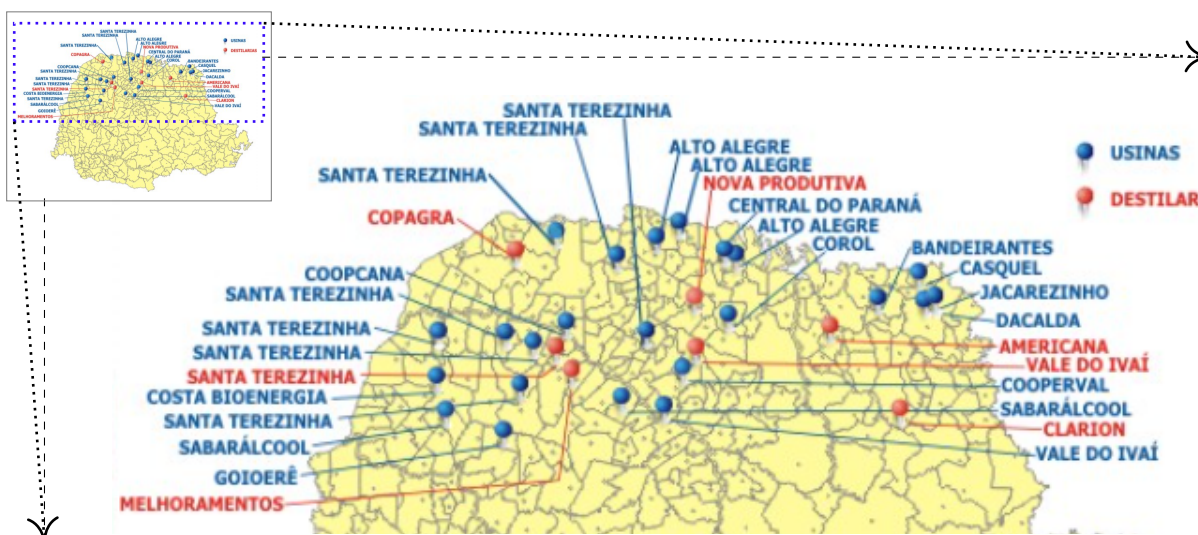
Além da própria cadeia produtiva, o setor sucroenergético ainda movimenta vários outros setores. Desde indústrias de maquinários e insumos agrícolas, até indústrias que dependem de seus produtos, como indústrias de alimentos, produtos químicos e bioenergia.

2.2 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ.

O Estado do Paraná possui diversos fatores favoráveis ao agronegócio, como boa localização geográfica para o escoamento da produção. Com o Porto de Paranaguá

sendo responsável por boa parte do escoamento de produtos exportados do país. Além disso, possui grande disponibilidade de mão de obra qualificada e boa infraestrutura em redes de transmissão elétrica e comunicação (LOURENÇO, 1999).

FIGURA 2 – USINAS E DESTILARIAS DO PARANÁ.



FONTE: Adaptado de (ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR, 2011).

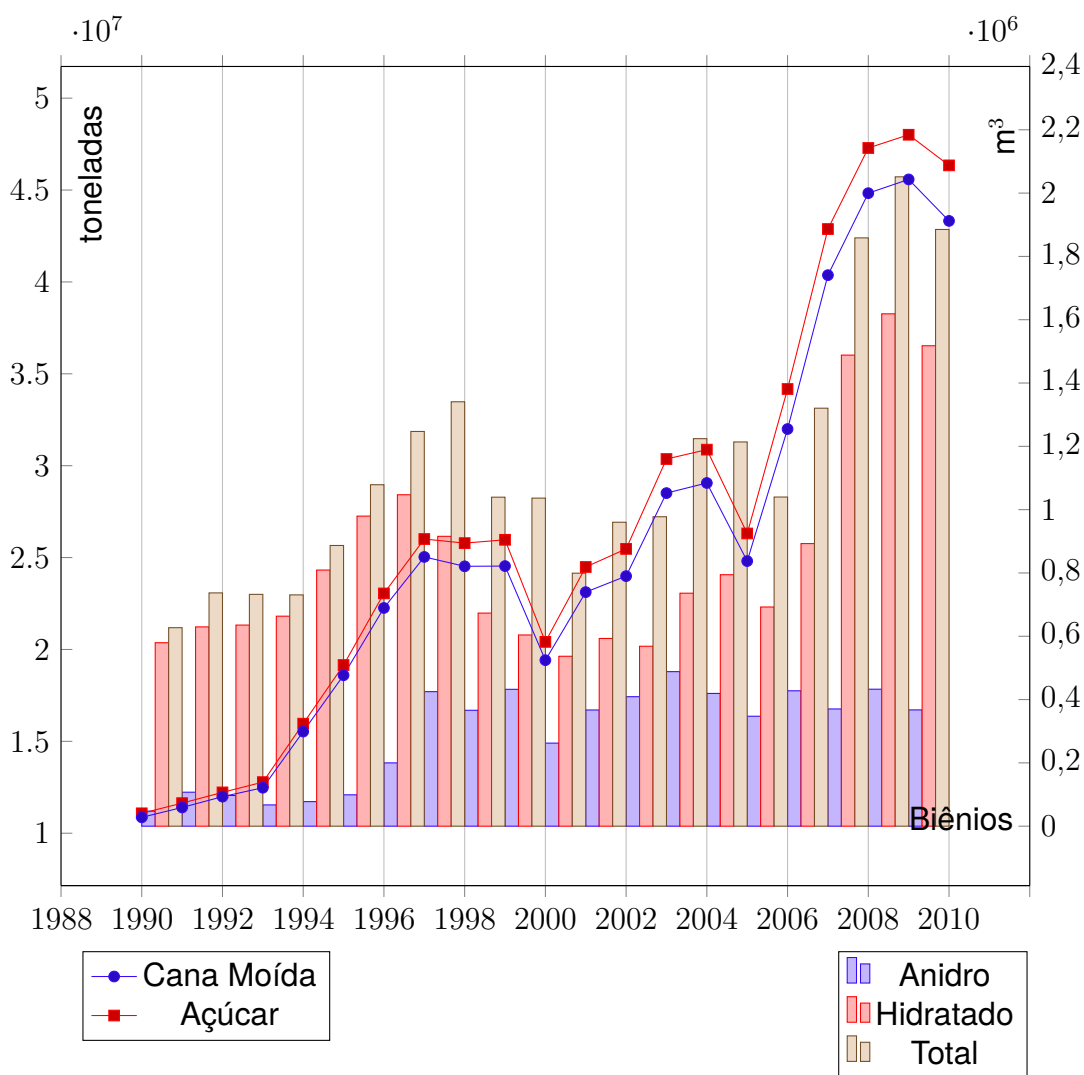
Segundo Shikida (2001), até meados da década de 1960 a produção de água ardente e cana-de-açúcar do Paraná não era expressiva no panorama nacional. Visto que a produção própria não supria o mercado interno, era comum a importação desses produtos de outras regiões. Até 1979, o setor sucroalcooleiro paranaense era composto apenas pelas usinas: Bandeirantes, no município de Bandeirantes; Central Paraná, no município de Porecatu; Jacarezinho, no município de Jacarezinho, e Morretes, no litoral do estado. Porém, este cenário se modificou quando o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) instituído pelo Decreto nº 76.593 (BRASIL. SENADO FEDERAL, 1975), estimulou a produção de álcool hidratado e a expansão das destilarias autônomas (ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR, 2011).

Seguindo as novas perspectivas, houve a implantação de 23 novas unidades produtoras de álcool na região norte do Estado, devido às condições de solo e clima nessa região serem propícias para o cultivo da cana-de-açúcar. A FIGURA 2 apresenta a distribuição espacial das usinas e destilarias existentes no Paraná, conforme dados da Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR, 2011).

Segundo dados da Comissão Executiva Nacional do Alcool (SHIKIDA, 2001), com o apoio governamental, houve um acréscimo na área de cana colhida no estado, passando de 57.990 ha em 1980, para 140.772 em 1986. Deste modo, a participação do Paraná passou de 2,2% para mais de 5% da produção nacional conforme apresentado no gráfico da FIGURA 3.

Outro fator que auxiliou na expansão desse setor no Paraná foi a criação da Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (ALCOPAR) em 1981, que auxiliou na organização da produção, dando suporte com pesquisas, tecnologias, e subsídios na formação dos preços da cana-de-açúcar e derivados (ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR, 2011).

FIGURA 3 – HISTÓRICO DA PRODUÇÃO



FONTE: Baseado em Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná - ALCOPAR (2011)

TABELA 1 – HISTÓRICO DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR ENTRE 1990 E 2011 NO PARANÁ.

Safr biênios	Área ha	Cana Moída ton	Açúcar	Etanol		
				Anidro	Hidratado	Total
				m ³		
90/91	-	10.862.957	221.113	47.491	579.588	627.079
91/92	179.684	11.401.098	235.827	107.369	629.608	736.977
92/93	180.850	11.989.326	232.776	97.024	635.347	732.371
93/94	191.314	12.475.268	305.148	67.250	663.449	730.699
94/95	202.203	15.531.485	430.990	77.612	809.180	886.792
95/96	236.511	18.596.119	555.842	99.099	979.613	1.078.712
96/97	273.679	22.258.512	789.858	199.998	1.047.023	1.247.021
97/98	313.928	25.035.471	973.718	425.002	915.756	1.340.758
98/99	315.819	24.524.685	1.261.913	366.185	673.197	1.039.382
99/00	313.052	24.537.742	1.430.202	432.412	604.034	1.036.446
00/01	293.633	19.416.206	996.542	262.429	536.839	799.268
01/02	296.077	23.120.054	1.367.066	367.141	593.071	960.212
02/03	319.781	23.990.528	1.481.723	409.082	568.489	977.571
03/04	332.123	28.508.496	1.854.528	488.210	736.037	1.224.247
04/05	356.377	29.059.588	1.814.525	419.418	794.445	1.213.863
05/06	363.843	24.809.178	1.503.421	347.368	692.463	1.039.831
06/07	403.741	31.994.580	2.178.076	427.754	892.729	1.320.483
07/08	486.127	40.369.063	2.509.288	370.350	1.488.203	1.858.553
08/09	536.275	44.829.652	2.459.512	432.775	1.618.640	2.051.415
09/10	573.583	45.578.529	2.430.692	367.385	1.517.736	1.885.121
10/11	586.423	43.320.724	3.022.089	271.770	1.347.567	1.619.337

FONTE: (ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR, 2011).

Pode-se observar essa expansão do setor pelo crescimento em quantidade de área plantada entre 1990 e 2011, conforme mostrado na TABELA 1. Esses dados mostram que o açúcar é o principal produto produzido pelo setor, tendo crescido 1366% no período 1990-2011, acompanhado em segundo lugar pelo álcool, que teve um crescimento de produção de 258% no mesmo período.

2.3 A LOGÍSTICA DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Uma indústria canavieira é composta por inúmeras áreas de plantio (canaviais), distribuídas sobre uma dada região, e uma ou mais usinas responsáveis pelo processamento da cana-de-açúcar.

No caso da cooperativa de estudo, o sistema é composto por uma única usina. A FIGURA 4 mostra um exemplo da distribuição espacial de alguns dos canaviais associados à Cooperativa. Essa distribuição espacial dos canaviais é um dos fatores que tornam a logística de colheita da cana-de-açúcar um trabalho caro e complexo ao mesmo tempo.

Nos canaviais, a área de plantio é dividida em áreas menores, denominadas de talhões. Geralmente os talhões são separados por estradas que permitem o acesso às áreas de plantio. Em períodos de safra, os talhões a serem cortados são definidos diariamente pela usina. A quantidade a ser cortada depende da capacidade de moagem diária, quantidade de cana em estoque na usina, capacidade diária de transporte da frota de caminhões, e da disponibilidade de maquinários para formar a Frente de

Corte (FC). Uma FC é composta por vários equipamentos: colhedoras e cortadeiras (responsáveis por cortar a cana dentro dos talhões), caminhões pequenos ou tratores com reboques (responsáveis por retirar a cana colhida de dentro dos talhões e transferir para caminhões maiores), e outros maquinários, como caminhão tanque (para abastecimento), caminhão oficina (para manutenção), motoniveladora (para adequar estradas), e etc.

FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ALGUNS CANAVIAIS DA COOPERATIVA CE.

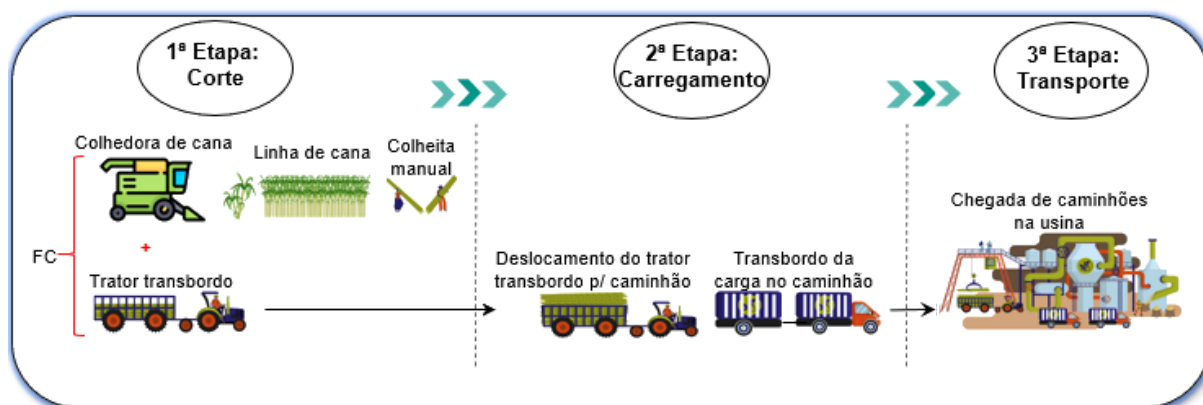


FONTE: Os autores (2021).

A colheita da cana-de-açúcar é o processo logístico de cortar e transportar a matéria prima do campo para as usinas. Pode-se dividir a colheita em três etapas bem definidas: corte, carregamento e transporte, conforme ilustrado na FIGURA 5.

Durante a colheita, a etapa de corte consiste em cortar a cana dentro dos talhões. O carregamento consiste em retirar a cana cortada de dentro dos talhões e carregá-la em caminhões que efetuam o transporte até a usina.

FIGURA 5 – PROCESSO DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR.



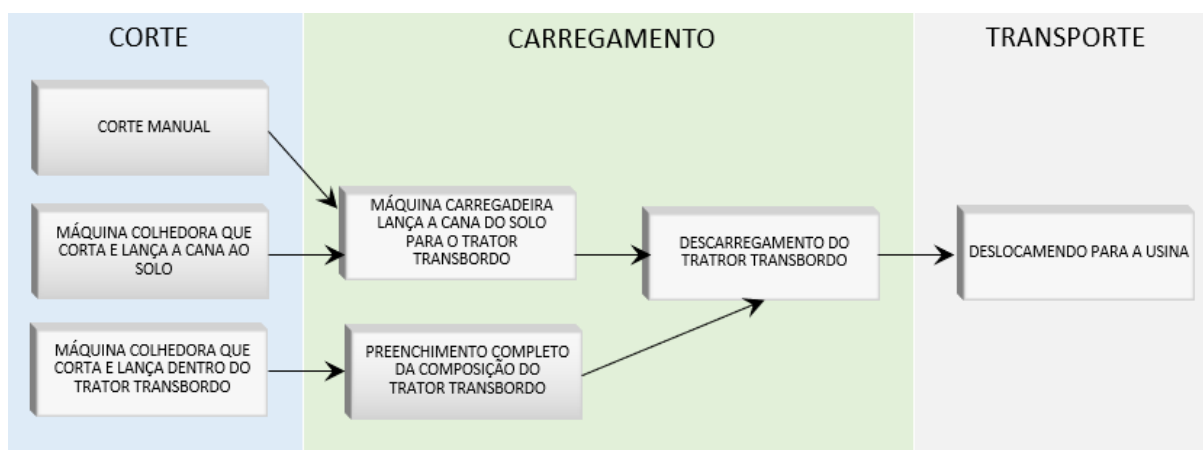
FONTE: Os autores (2021).

2.3.1 Tipos de colheita

Até décadas atrás, o trabalho no setor sucroalcooleiro era exclusivamente braçal, realizado por trabalhadores rurais sob as mais variadas condições de trabalho. Entretanto, essa realidade passou por mudanças nas últimas décadas. A colheita passou a substituir muito trabalho manual por trabalho mecanizado (SILVA; GARCIA, 2009). Embora isso tenha acontecido, o trabalho manual ainda não foi totalmente extinto. Em muitas usinas, a topografia dos canaviais não permite uma colheita totalmente mecanizada e ainda é necessário empregar o corte manual em alguns locais (SILVA; GARCIA, 2009).

Em geral, a colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada combinando-se diferentes operações empregadas nas etapas de corte, carregamento e transporte, conforme descrito na FIGURA 6.

FIGURA 6 – TIPOS DE COLHEITA.



FONTE: Os autores (2021).

Na etapa de corte existem três tipos de operações: corte manual, corte com cortadeira, e corte com colhedora.

- **Corte manual**: nesta operação (FIGURA 7), o processo de corte é realizado por pessoas utilizando-se de facões. Esta operação possui as vantagens de: reduzir as impurezas no caldo; diminuir a

perca da matéria prima, devido ao corte ser rente ao solo; não lesionar a base da soqueira; reduzir as pragas e os cortes desiguais; e elevar a brotação da cana, aumentando a produtividade do canavial em novas colheitas (SILVA; GARCIA, 2009).

FIGURA 7 – CORTE MANUAL.



FONTE: Cursos CPT (2012).

- **Corte com cortadeira:** neste tipo de operação (FIGURA 8), a cana é cortada por uma máquina e lançada ao solo para ser coletada posteriormente.

FIGURA 8 – CORTE COM CORTADEIRA.



FONTE: TECNOLOGIA (2015).

- **Corte com colhedora:** neste tipo de corte (FIGURA 9), a cana é cortada por uma colhedora, triturada em pequenos pedaços, e lançada em um caminhão ou caçamba rebocada por um trator (FIGURA 9) que faz o transbordo da carga para caminhões maiores posteriormente.

FIGURA 9 – CORTE COM COLHEDORA.



FONTE: Rodrigues (2020)

Na etapa de carregamento existem dois tipos de operações: carregamento com carregadeira e carregamento com colhedora.

- **Carregamento com carregadeira:** este tipo de carregamento é realizado por uma máquina carregadeira hidráulica que junta a cana solo e carrega em caminhões menores ou caçambas rebocadas por tratores (FIGURA 10). Esta operação é empregada em conjunto com as operações de corte manual ou com cortadeiras, onde a cana é cortada e depositada no solo para ser coletada posteriormente.

FIGURA 10 – CARREGAMENTO COM MÁQUINA CARREGADEIRA.



FONTE: Canavieiros (2019).

- **Carregamento com colhedora:** este tipo de carregamento é realizado em conjunto com a operação de corte com colhedora, onde a cana é cortada, triturada e enviada diretamente para um caminhão ou caçamba rebocada por trator (FIGURA 9).

Em ambos os tipos de carregamento, a carga é retirada dos talhões, por caminhões pequenos ou tratores rebocando caçambas, e transferidas para caminhões maiores que efetuam o transporte da matéria prima até a usina. Esta operação de transferência de cargas para caminhões maiores é chamada de *operação de transbordo* (FIGURA 11).

FIGURA 11 – TRANSBORDO DA CARGA DOS TRATORES PARA OS CAMINHÕES.



FONTE: Os autores (2021).

Na etapa de transporte, os caminhões chegam em uma FC e estacionam em pontos de transbordo, localizados nas estradas de contorno dos talhões, para receberem as cargas menores. Quando cheios, os caminhões transportam as cargas até a usina. Ao chegar na usina, os caminhões são pesados, para saber o volume da carga. Posteriormente, passam por uma segunda pesagem, onde se extrai uma amostra do caldo para análise do teor de sacarose. Este teor define o valor da carga para o pagamento de produtores (GRISOTTO, 1995). Após descarregar na usina, os caminhões podem retornar a uma FC para efetuar o transporte de uma nova carga.

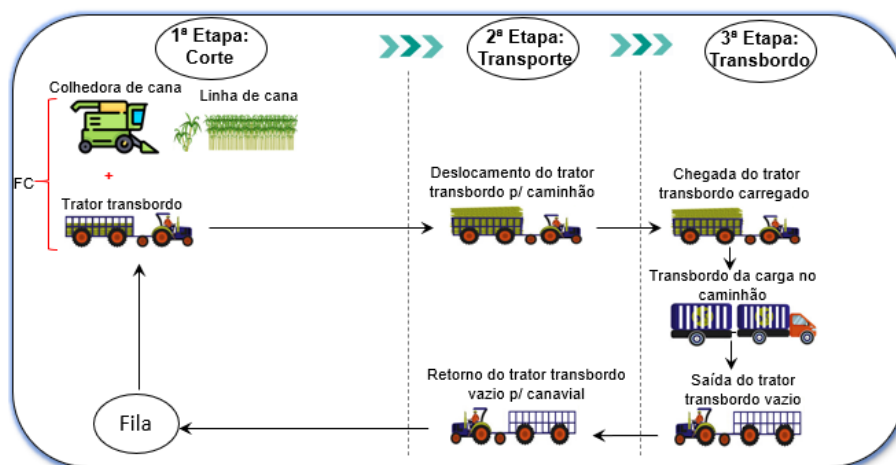
Os tipos de caminhões utilizados no transporte podem ser simples (com capacidade para 15 toneladas), Romeu-e-Julietta (com capacidade para 30 toneladas), e Treminhão (com capacidade para 45 toneladas) (GRISOTTO, 1995; RANGEL et al., 2009).

2.3.2 O corte, transporte e transbordo na colheita mecanizada

Na colheita mecanizada com colhedoras, as etapas de corte e carregamento ainda podem ser divididas em: corte, transporte e transbordo. O Corte, Transporte e Transbordo (CTT) é a logística realizada dentro dos talhões do canavial, pela colhedora e pelos rebocadores de carga que transferem a cana colhida para os caminhões.

Na cooperativa CE, o CTT é ilustrado na FIGURA 12. Durante a colheita, a colhedora percorre cada linha de plantio cortando a cana-de-açúcar, triturando em pequenos pedaços, e descarregando em uma caçamba rebocada por um trator (denominado por trator transbordo) que acompanha o trajeto da colhedora, conforme mostra a FIGURA 9.

FIGURA 12 – PROCESSO DE CORTE, TRANSPORTE E TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA COOPERATIVA.



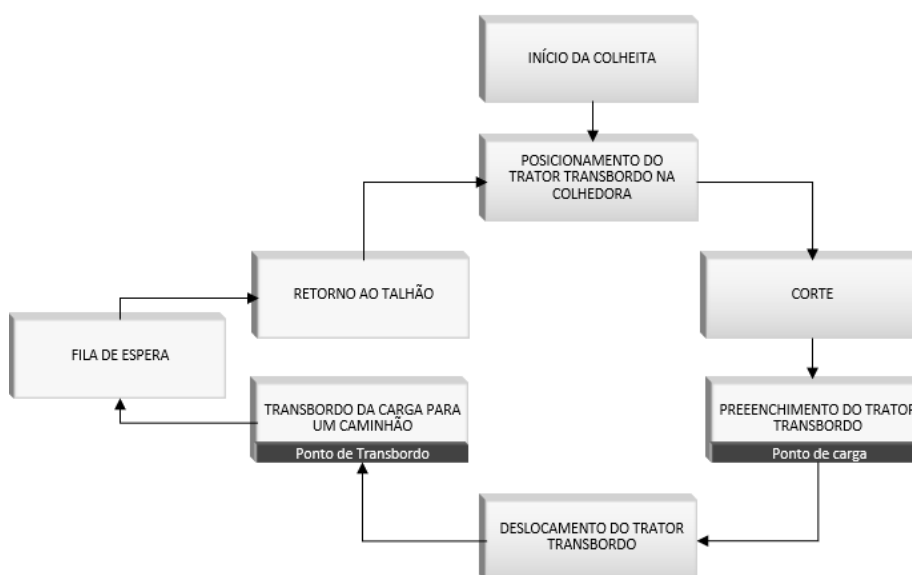
FONTE: Os autores (2021).

Quando essa caçamba enche, o trator transbordo se desloca de dentro do talhão, do ponto que está (ponto de carga), até um ponto fora dele (ponto de transbordo), localizado em alguma estrada de acesso aos talhões do canal, para realizar a transferência da carga para os caminhões maiores, conforme a FIGURA 11.

Após o transbordo da carga para os caminhões, o trator retorna para uma fila para entrar na colhedora e efetuar nova carga. Este processo é repetido até colher todo o talhão. Normalmente são utilizados dois ou mais tratores transbordo, quando um enche, outro trator entra no lugar para evitar que a colhedora fique ociosa.

A FIGURA 13 descreve esse fluxo de operações, definindo o conceito de *pontos de carga* e *pontos de transbordo*.

FIGURA 13 – FLUXO DE OPERAÇÕES NO CTT DA COOPERATIVA.



FONTE: Os autores (2021).

2.4 O SISTEMA QGIS

Segundo Cavalcante (2015), o geoprocessamento é um conjunto de tecnologias para coleta, tratamento, manipulação e análise de dados espaciais.

O QGIS¹ é um sistema de informação geográfica utilizado para tarefas de geoprocessamento. Ele é um *software* livre e de código aberto mantido pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). O sistema funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android, permitindo a criação de mapas em camadas *raster* ou vetorial usando diferentes sistemas de projeções cartográficas.

Em um formato de dados vetorial, os objetos são descritos por geometrias como: pontos, linhas, e polígonos. Em um formato *raster*, os objetos são representados por imagens armazenadas em forma de matriz de *pixels*.

O QGIS suporta vários formatos de dados como DXF, ESRI *Shapefile*, GeoJSON, etc. Em especial, os *shapefiles* são arquivos que armazenam dados espaciais em formato vetorial. Isto é, um arquivo *shapefile* representa um dos seguintes tipos de geometria: ponto, linha, ou polígono. Essas geometrias permitem representar uma infinidade de objetos nos mapas, como: construções, rios, rodovias, limites de propriedades, etc. Além disso, cada *shapefile* permite o armazenamento de uma tabela de atributos, que servem para descrever características dos objetos representados no mapa.

Além do QGIS fornecer uma interface gráfica com várias ferramentas de geoprocessamento para usuários comuns, ele ainda possui API's Python e C++ para desenvolvedores, permitindo a criação de *plugins*, *softwares* ou simples *scripts* para automatizar tarefas a partir das funcionalidades já existentes no QGIS. Por padrão, o QGIS já vem com um console de Python embutido, permitindo a criação de *scripts* para manipular dados armazenados em *shapefiles* por meio da API PyQGIS².

2.5 A PESQUISA OPERACIONAL PARA TOMADA DE DECISÃO

A Pesquisa Operacional (PO) é um ramo das engenharias voltado ao estudo de métodos de auxílio à tomada de decisão. O estudo da pesquisa operacional começou durante a segunda guerra mundial, com a finalidade de administrar recursos escassos, como a movimentação eficiente de tropas, armamentos e suprimentos (TIWARI, 2007).

Após a segunda revolução industrial, os estudos da PO passaram a ser aplicados principalmente para auxiliar em processos de tomada de decisão na indústria (TIWARI, 2007). Normalmente um método de PO visa encontrar a melhor solução para um problema de tomada de decisão sujeito à várias restrições, tais como: restrições de tempo, distância, limitações de equipamentos, ocorrência de incertezas, etc.

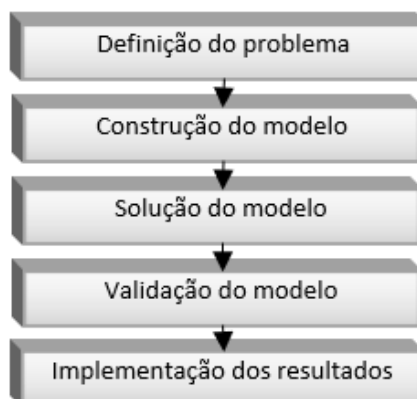
O mercado exige das empresas melhores tomadas de decisões, com a finalidade de encontrar melhores resultados e elevar a competitividade frente aos concorrentes (DAVIS, 2001). Com base nisto, os métodos de PO possibilitam uma análise do problema com base em cálculos matemáticos, proporcionando soluções otimizadas e evitando decisões puramente empíricas que levam, na maioria das vezes, ao desperdício de recursos (BARCELOS; EVANGELISTA; SEGATTO, 2012).

Em geral, um estudo de PO consiste em construir um modelo matemático para representar um problema real seguindo as etapas descritas no fluxograma da FIGURA 14.

¹ <https://www.qgis.org/>

² <https://qgis.org/pyqgis/>

FIGURA 14 – ETAPAS DE UM ESTUDO DE PO.



FONTE: Adaptado de (BEZERRA, 2011).

1. **Definição do problema:** a primeira etapa consiste em: descrever os objetivos a serem estudados, identificar as alternativas de decisão existentes, reconhecer limitações, restrições e exigências. O estudo deve captar na formulação do problema, os desejos e as necessidades com relação ao problema de decisão.
2. **Construção do modelo:** a segunda etapa, consiste em representar o problema matematicamente.
3. **Solução do modelo:** a terceira etapa, tem por objetivo, encontrar uma solução para o modelo construído, buscando o algoritmo mais adequado, levando em consideração o tempo de processamento e a qualidade da solução.
4. **Validação do modelo:** a quarta etapa consiste em verificar se a resposta do modelo possui significância prática. Isto é, se pode ser implementada para uso real. Caso contrário, a construção do modelo pode ser revista para realização de melhorias.
5. **Implementação dos resultados:** a última etapa, é responsável por implementar as soluções que forem validadas na etapa anterior.

Para obter resultados seguros e confiáveis, o modelo matemático deve ser fiel ao problema real, sem interferências e apresentado de modo quantitativo. Os dados utilizados, devem corresponder ao problema real (ARENALES et al., 2015).

2.5.1 Métodos heurísticos

A maioria dos problemas de otimização estudados na área de PO são intratáveis, o que significa que eles possuem alta complexidade de resolução computacional. Deste modo, algoritmos exatos geralmente demandam muito tempo de computação para resolvê-los e encontrar uma solução ótima.

Por outro lado, métodos heurísticos são algoritmos aproximativos que surgiram, no final da década de 1950, como uma alternativa de resolução para problemas de otimização intratáveis, para os quais os algoritmos exatos apresentam complexidade de tempo exponencial. Métodos heurísticos não garantem uma solução ótima, entretanto apresentam um bom balanceamento entre perda de otimalidade e tempo de computação necessário para resolver o problema (ARENALES et al., 2015). Embora algoritmos heurísticos não ofereçam garantias de otimalidade, na prática seus resultados sempre são boas aproximações da solução ótima (ARENALES et al., 2015).

O crescimento do interesse pela utilização de métodos heurísticos ocorreu depois do surgimento da teoria da complexidade computacional, na década de 1970. Em resumo, esta teoria destina-se a classificar problemas de acordo com sua dificuldade de resolução computacional. Os problemas intratáveis (*NP-Hard*) são aqueles em que a solução requer recursos computacionais significativos, qualquer que seja o algoritmo usado. Muitos dos problemas de otimização não podem ser resolvidos por métodos exatos em um tempo computacional aceitável. Isto é, os algoritmos conhecidos que conseguem encontrar a solução ótima do problema, possuem tempo de computação impraticável (ARENALES et al., 2015).

Algoritmos heurísticos geralmente são construídos com técnicas de: aleatoriedade, gulosidade, refinamento e/ou intensificação (AGUIAR; MAURI; SILVA, 2018). A aleatoriedade permite que o algoritmo percorra o espaço de soluções do problema aleatoriamente, escapando de ótimos locais. A gulosidade, busca uma solução baseada em escolhas ótimas locais. Isto é, a cada passo é feita a escolha que gera o melhor ganho possível, sem se preocupar com o resultado final. O refinamento visa encontrar soluções melhores a partir de uma solução conhecida. A intensificação consiste em reforçar o refinamento sobre soluções de boa qualidade com a finalidade de se aproximar do ótimo global (AGUIAR; MAURI; SILVA, 2018).

Segundo Silver et al. (1980), os métodos heurísticos também podem ser classificados pela estratégia utilizada para construir ou refinar soluções:

- Métodos construtivos: esse tipo de algoritmo adiciona componentes individuais na solução, de forma incremental, até construir uma solução factível. Normalmente a técnica utilizada é a técnica gulosa.
- Métodos de decomposição: consistem em dividir o problema em subproblemas menores. A saída de um subproblema é a entrada do subproblema seguinte. Desta forma, a resolução destes subproblemas resultam na solução do problema maior.
- Métodos de redução: identifica alguma característica que provavelmente deva aparecer na solução ótima, simplificando o problema.
- Manipulação de modelos matemáticos: modifica o modelo, com o objetivo de torná-lo mais fácil de resolver. A solução do problema, pode consistir em reduzir o espaço de solução (agrupando variáveis, linearizando funções), ou aumentar, eliminando as restrições por exemplo.
- Métodos de busca em vizinhança: geralmente são empregados em metaheurísticas. Neste tipo de método, parte-se de uma solução conhecida, solução corrente, e gradualmente explora-se soluções vizinhas realizando-se pequenas alterações na solução corrente. No final, a melhor solução encontrada é retornada (SILVER et al., 1980).

Dada a dificuldade de resolver muitos problemas de otimização de forma exata, os algoritmos heurísticos são aplicados, com bom senso, para encontrar soluções de boa qualidade, de modo rápido e fácil (EVANS, 1987). Em geral, eles são adequados para situações que se enquadram nos seguintes requisitos:

- Inexistência de um método que apresente uma solução ótima.
- Existe um método exato para a resolução do problema, porém ele exige muito tempo computacional ou memória, além de outros recursos.
- Quando não se necessita de uma solução ótima.
- O problema apresenta dados pouco confiáveis.
- A solução do algoritmo heurístico é a entrada para a aplicação de outro algoritmo (EVANS, 1987).

Além disso, os métodos heurísticos possuem as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Espera-se que produzam soluções sub-ótimas em um tempo de cálculo razoável;
- Ferramenta útil para problemas reais;
- Utilizam uma fração do esforço computacional de um método exato;
- Permitem maior flexibilidade no manejo de características do problema.

Desvantagens:

- Não há garantia de que as soluções providas otimizem a função objetivo;
- Em geral, há falta de rigor matemático;
- Não é possível conhecer a qualidade da solução apresentada, ou seja, quão próxima está da solução ótima.

2.6 ESTUDOS SOBRE A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Esta seção apresenta, os principais trabalhos relacionados a colheita, transporte, e transbordo da cana-de-açúcar. O estudo da modelagem aliados a métodos da área da PO, com o auxílio de ferramentas computacionais, para a obtenção de resultados otimizados que auxiliaram no processo de tomada de decisão aplicadas ao campo.

2.6.1 Modelo matemático para o plantio e colheita da cana-de-açúcar

Para atender as demandas com a finalidade de obter altas produtividades, faz se necessário um planejamento adequado do ciclo da cultura, desde o preparo do solo, plantio e colheita, até o manuseio e transporte até a usina (SILVA; ISLER et al., 2013).

De acordo com Silva, Isler et al. (2013), um plantio de qualidade, somado a outros fatores tem influência direta na determinação de uma boa produtividade e a redução de custos, sendo que tais resultados advém de um bom planejamento, e muito conhecimento técnico, sendo as tomadas de decisões nesta fase são responsáveis por influenciar não somente todo planejamento da colheita, mas também todo o ciclo da cultura.

O aumento da produtividade no setor sucroalcooleiro, é conseguido com a introdução de novas variedades de cana-de-açúcar e com manejo correto da cultura, buscando a época de colheita em que a produtividade agroindustrial se encontra maximizada (SILVA; ISLER et al., 2013).

O método utilizado por Silva, Isler et al. (2013), tem por objetivo escolher quais são as variedades e as épocas de plantio e colheita, com o auxílio de ferramentas para desenvolver o planejamento tanto do plantio quanto da colheita da cana-de-açúcar, para o aumento da produtividade em um período de cinco anos.

Sendo assim, foi representado um modelo matemático desenvolvido com o objetivo de maximizar a produtividade total ao longo do horizonte proposto (5 anos), com a realização de quatro cortes (SILVA; ISLER et al., 2013).

Levando-se em consideração índices associados aos talhões (período e variedade da cana) para maximizar a produtividade, e restrições como a demanda de açúcar da usina em toneladas, e

exigências da quantidade de fibras pela usina na matéria prima, para a aplicação de um modelo de Programação Não Linear Inteira 0-1 (SILVA; ISLER et al., 2013).

Devido o número de talhões nas usinas atuais inviabilizar a resolução do problema através de técnicas de otimização exata, os pesquisadores Silva, Isler et al. (2013), propuseram o modelo de um Algoritmo Genético, associando a estrutura de alterações genéticas partidas do cruzamento de informações como: **Estrutura do cromossomo (1)**, com a construção de matrizes representando os talhões, linhas destinadas aos meses de plantio e colheita; **Geração da população inicial (2)**, o segundo passo foi a geração da população inicial de indivíduos; **Avaliação dos indivíduos (3)** a cada iteração seleciona-se o indivíduo mais apto, comparando-o com a elite anterior, e a elite é atualizada; **Operadores genéticos (4)**, os indivíduos da população evoluem de acordo com operadores genéticos de seleção, cruzamento (*crossover*) e a *mutação*, de forma que promova uma tendência dos indivíduos representarem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua e finalmente **Parada (5)**, sendo a parada feita pelo número de gerações, a solução ótima aproximada apresenta a melhor aptidão na elite final. (SILVA; ISLER et al., 2013).

Desta forma os pesquisadores Silva, Isler et al. (2013) propuseram um modelo de otimização para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar, através da elaboração de um algoritmo Genético.

2.6.2 Programação das frentes de colheita visando o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte

Segundo Junqueira e Morabito (2017), o problema de sequenciamento de frentes de corte é complexo e envolve vários fatores, tais como o estágio de maturação da cana-de-açúcar, colheita, transporte da matéria prima, e a capacidade de moagem da usina.

FIGURA 15 – MÉTODO HEURÍSTICO PROPOSTO.



FONTE: Junqueira e Morabito (2017).

O estudo abordado por Junqueira e Morabito (2017), é aplicado para a resolução do problema de designação das frentes de corte, sendo utilizado um modelo de Programação Inteira Mista (PIM), de dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção em máquinas paralelas com custos e tempos de *setup* dependentes da sequência.

Para isso, no trabalho abordado por Junqueira e Morabito (2017), foram propostos métodos baseados em heurísticas PIM para desenvolver um modelo em uma situação real de uma safra de uma empresa típica do setor, inspirados em uma heurística de agregação de blocos de colheita, em heurísticas de construção do tipo *relax-and-fix* e heurísticas de melhoria do tipo *fix-and-optimize*.

Para a realização da modelagem do problema, foram consideradas a abordagem de blocos de colheita, devendo ser sequenciados em frentes de colheita em um horizonte de tempo. As etapas da pesquisa são apresentadas da FIGURA 15 (JUNQUEIRA; MORABITO, 2017).

Como apresentada na FIGURA 15, a primeira etapa da pesquisa, denominada de **agregação de blocos (1)**, foram agregados os blocos de colheita, de tal forma que não se descaracterizassem variáveis como a distância do bloco em relação à usina e o potencial de colheita. Na segunda etapa denominada de **heurística construtiva (2)**, foram propostos métodos heurísticos baseados em PIM, como *relax-and-fix*, para a construção de soluções iniciais factíveis. E por fim, a terceira **etapa de heurísticas de melhoria (3)**, envolveu a utilização do método *fix-and-optimize*, para buscar a melhoria da solução construída na etapa 2 (JUNQUEIRA; MORABITO, 2017).

Com isto, foram obtidos como resultados a designação e sequenciamento das frentes de corte.

2.6.3 Otimização da rota da colhedora na colheita mecanizada

A mudança de corte manual da cana-de-açúcar para o mecanizado, vai muito além de uma substituição de técnica. Esta alteração significa combinar e otimizar aspectos como: o preparo do solo na lavoura, o dimensionamento dos equipamentos no campo, a equipe de manutenção e apoio, o treinamento do pessoal envolvido, além das alterações no transporte e recepção da cana na indústria (SANTORO, 2016).

Para isso o trabalho de Santoro (2016), propõe um modelo matemático com o objetivo de auxiliar na resolução do Problema do Planejamento da Rota da Colhedora (PPRC), que se trata de um problema de roteamento de arcos e, basicamente consiste em decidir qual a melhor rota a ser realizada pela máquina colhedora de cana-de-açúcar, visando a otimização, visto que é conhecido o *layout* do canavial.

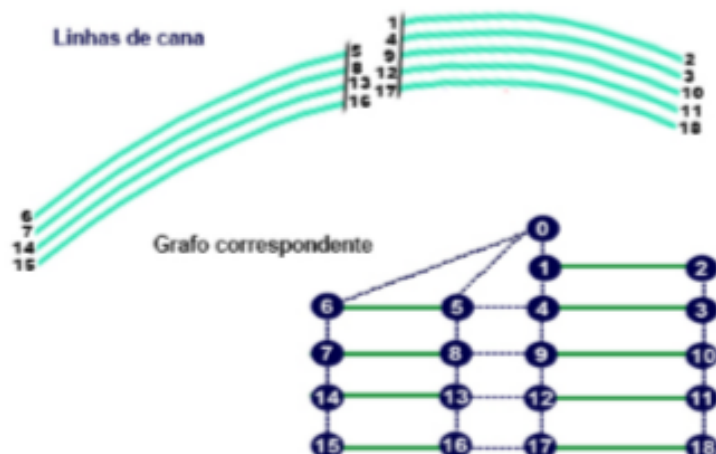
O modelo matemático, visa minimizar o tempo de manobra da colhedora, passando por todas as linhas de cana do talhão. Também é considerado o tempo de manobra, e o tempo em que a colhedora não está colhendo (SANTORO, 2016).

As linhas de cana são retratadas na FIGURA 16, foi construído um grafo não orientado, sendo que linha de cana é correspondente a uma aresta limitada por dois vértices do grafo que basicamente são formados por dois conjuntos: um conjunto de nós chamados vértices e um conjunto chamado arco, ou arestas; cada arco está associado a dois vértices: o primeiro é a ponta inicial do arco e o segundo é a ponta final (SANTORO, 2016).

As arestas do grafo na FIGURA 16, representam o tempo de manobra da máquina colhedora e os custos associados (SANTORO, 2016).

Com isto, o objetivo do trabalho de Santoro (2016), foi o planejamento da rota da máquina colhedora, no processo da colheita da cana-de-açúcar, através da formulação de um modelo matemático de otimização para o planejamento do percurso realizado, reduzindo o tempo necessário de manobra, baseado no problema do carteiro rural.

FIGURA 16 – EXIBIÇÃO DAS LINHAS DE CANA COMO GRAFO.



FONTE: Santoro (2016).

2.6.4 Otimização do transporte da cana-de-açúcar por caminhões

A origem do trabalho de Grisotto (1995) se deu através de um problema frequentemente encontrado nas usinas produtoras de açúcar e álcool: o transporte de cana-de-açúcar. Um problema complexo e que envolvem gastos se não houver um bom planejamento.

Com isso, o objetivo do estudo de Grisotto (1995), foi determinar um modelo que estabeleça um método de designação de caminhões, que retire toda a cana das frentes de corte, dentro de um respectivo período de tempo, considerando a taxa de moagem da cana constante, e respeitando as restrições como carregamento e descarregamento a um custo mínimo. Supondo que não ocorram imprevistos no campo.

Devido a complexidade do problema, não foi possível encontrar sua resolução em literaturas, consequentemente não se pode classificar o problema com métodos de resoluções já existentes, desta forma (GRISOTTO, 1995) optou pela resolução do problema aplicando uma modelagem matemática associada a um método exato de resolução e uma heurística.

Devido a integralidade das variáveis e as grandes dimensões do terreno, foi realizada a modelagem do problema, escolhendo-se uma heurística de solução do problema linear, com isso, buscou-se o relaxamento das restrições de integridade, aproximando os valores reais para valores inteiros, o que proporcionou excelentes resultados, atingindo valores muito próximos aos ótimos dos problemas relaxados (GRISOTTO, 1995).

Primeiramente, Grisotto (1995) levantou a hipótese de se utilizar o algoritmo de resolução de problemas lineares como o algoritmo *Simplex*, porém, optou-se utilizar uma implementação de um algoritmo de pontos interiores primal-dual com barreiras. Posteriormente foram obtidas as designações dos caminhões e também foram construídos alguns cenários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é apresentado a classificação da pesquisa, a caracterização da empresa e toda a metodologia adotada para resolver o problema de estudo.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

As pesquisas são consideradas estudos onde se obtém novos conhecimentos, para a resolução de problemas com a aplicação de ferramentas científicas. Segundo Gil (2008), as pesquisas devem ser classificadas, levando em consideração a sua natureza, seus objetivos e procedimentos para a obtenção das respostas.

As pesquisas ao serem classificadas, quanto sua abordagem, são separadas por dois vieses, quantitativo e qualitativo. Na classificação quantitativa, são levadas em análise certos aspectos baseados em observações objetivas e quantificáveis, com pensamento lógico, e busca por atributos mensuráveis a experiência humana (GIL, 2008).

Quanto a classificação da natureza da pesquisa, pode se classificar como de natureza aplicada. isto é, objetiva a aplicação do conhecimento básico. Neste tipo de pesquisa os resultados poderão ser utilizados imediatamente na solução de problemas que ocorrem na realidade. (GIL, 2008).

Quanto aos objetivos, as pesquisas podem ser exploratórias, descritivas ou explicativas. As pesquisas exploratórias têm objetivo de agregar conhecimento ao problema, criando hipóteses, trazendo base para pesquisas futuras, criando hipóteses. As pesquisas descritivas têm por finalidade, descrever fenômenos de determinados problemas existentes. E por último, as pesquisas explicativas têm o objetivo de levantar variáveis de um problema (GIL, 2008).

E de acordo com o seu procedimento as pesquisas são classificadas como Pesquisa Experimental, Bibliográfica, Estudo de Caso, Pesquisa-Ação, Modelagem, ou Simulação.

Este trabalho apresenta uma abordagem quantitativa, por trabalhar-se com Pesquisa Operacional, e métodos matemáticos para a minimização de rotas. Com relação a natureza, ele é classificado como aplicado, utilizando o conhecimento científico para uma melhora do serviço na prática. Já o objetivo da pesquisa é normativa pois o modelo proposto propõem prescrever estratégias para otimizar o processo do que simplesmente descreve o processo como ele é, sendo descritivo por utilizar modelos de geocodificação (QGIS).

descritivo, devido a busca da solução de problema local, classificando-se como um estudo de caso, pois a pesquisa sugere uma necessidade específica de otimização (GIL, 2008).

Desta forma, a elaboração dos passos da pesquisa é mostrada na FIGURA 17.

Primeiramente, com ajuda da empresa, foi realizada uma visita em uma das frentes de corte, com o objetivo de visualizar possíveis problemas e levantar dados. A partir daí, foi realizada uma busca na literatura da área e foi caracterizado o problema em estudo, que se mostrou de relevância tanto científica, como prática.

FIGURA 17 – FLUXO METODOLÓGICO.



FONTE: Os autores (2021).

Com o estudo, foi possível identificar os métodos adequados para o desenvolvimento e resolução do problema. A partir dos resultados, realizou-se a análise da qualidade dos mesmos.

3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O estudo foi realizado em um dos talhões arrendados para o plantio de cana-de-açúcar por uma Cooperativa produtora de etanol, açúcar e produtos altamente proteicos para a alimentação de bovinos a base de milho (DDG Milho). A Propriedade fica localizada na região norte do Estado do Paraná no município de Bom Sucesso, estimada com tamanho de 60 alqueires. A empresa possui sede no município de Jandaia do Sul, que conta com cerca de 21 122 habitantes atualmente. Fundada em julho de 1980, por iniciativa de um grupo de agricultores, considerando as expectativas positivas do programa PROÁLCOOL, surgidas na época, uma vez que a cana-de-açúcar adquiria grande importância para o país como uma nova fonte energética, em função de sucessivas crises mundiais apresentadas pelo petróleo.

A empresa que possui atualmente 40 anos de mercado, com seus produtos sendo comercializados em todo o Brasil, com mais de 11.616,00 hectares de área de plantio de cana, e o aumento gradativo, provocou uma migração das frentes de corte manuais em 2009 para a prática do corte mecanizado.

Atualmente, a Cooperativa trabalha com um conjunto de frentes de trabalho para a alimentar uma moenda com capacidade de moagem em torno de 6,5 toneladas por dia, trabalhando em três turnos diários.

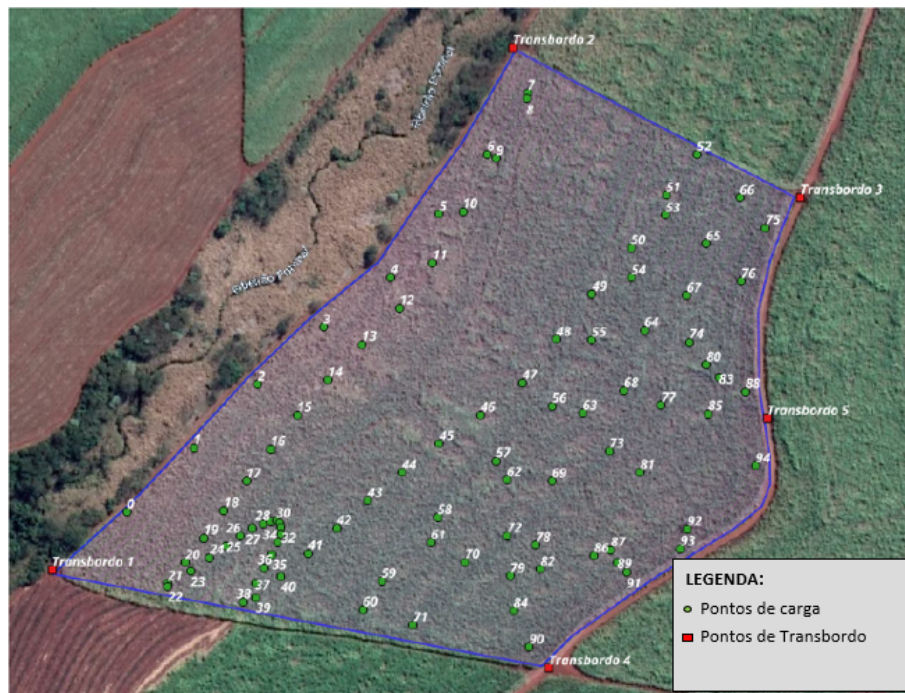
4 O PROBLEMA DE DESLOCAMENTO DE TRATORES TRANSBORDO

Este Capítulo, define o problema de pesquisa e descreve o estudo de caso realizado.

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema de deslocamento de tratores transbordo abordado é um problema logístico encontrado nas etapas do CTT definido na subseção 2.3.2. O problema foi definido com base em observações de campo realizadas durante operações de colheita mecanizada da cana-de-açúcar em um dos canaviais da cooperativa CE no município de Bom Sucesso, Estado do Paraná. A FIGURA 18 mostra o mapa de um dos talhões do canavial visitado.

FIGURA 18 – TALHÃO COM PONTOS DE TRANSBORDO EM LOCAIS ADEQUADOS.

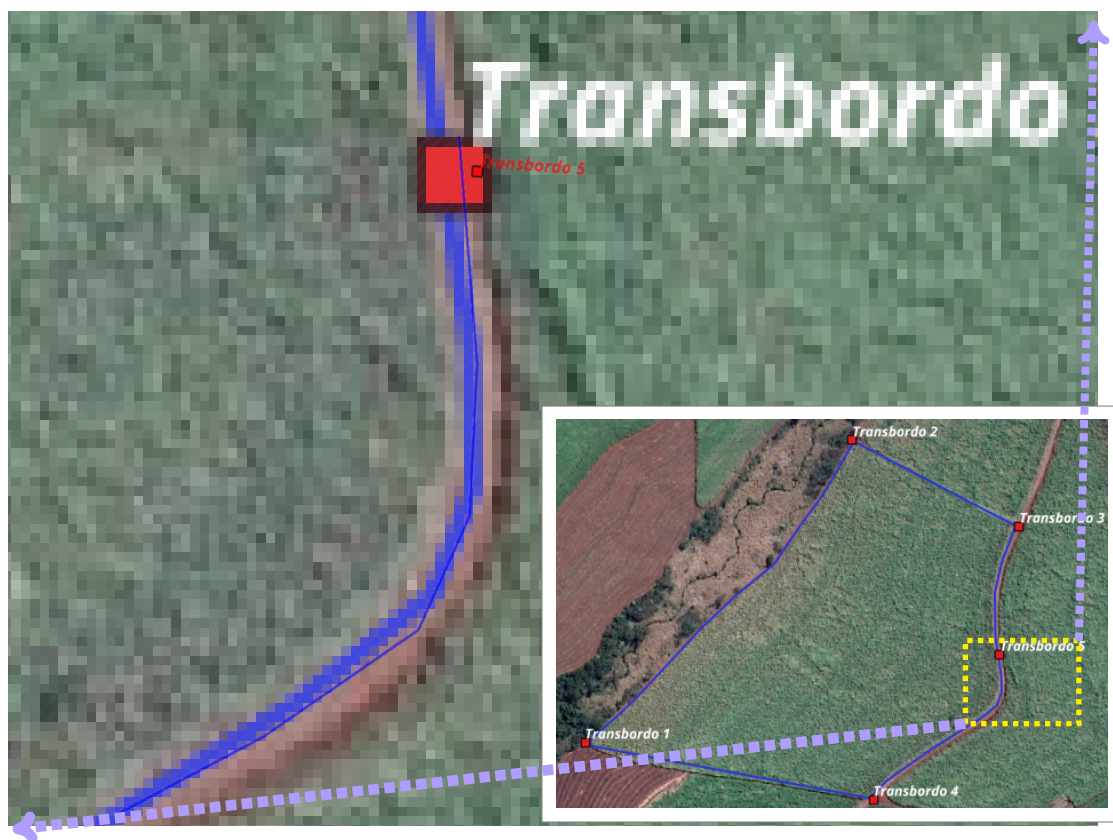


FONTE: Os autores (2021).

Conforme informações da Cooperativa, os pontos de transbordo só podem ser fixados em locais com topografia plana, para evitar danos aos equipamentos e perdas de carga durante a operação de transbordo para os caminhões. Na FIGURA 18, são mostrados cinco pontos com topografia adequada para fixação de pontos de transbordo.

A FIGURA 19 mostra detalhes das linhas de plantio da cana-de-açúcar. Conforme a colhedora caminha sobre as linhas de plantio, colhendo a cana, é possível estimar os pontos de carga (FIGURA 20) com base na produtividade das linhas.

FIGURA 19 – DETALHE DAS LINHAS DE PLANTIO DA CANA-DE-AÇÚCAR.



FONTE: Os autores (2021).

Dado os pontos de carga e possíveis pontos de transbordo, conforme mostrado na FIGURA 20, o problema de deslocamento de tratores transbordo consiste em designar os caminhões, que chegam ao canal, para estacionarem em pontos de transbordo estratégicos, de forma a minimizar o deslocamento que os tratores fazem dos pontos de carga até os pontos de transbordo.

FIGURA 20 – PONTOS DE CARGA ESTIMADOS COM BASE NA PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 500 METROS.



FONTE: Os autores (2021).

Durante a operação de corte da cana-de-açúcar, os tratores transbordo não podem trafegar transversalmente sobre as linhas de plantio, para não causar danos nas plantas. Quando eles entram em uma extremidade de uma linha, eles devem segui-la até sair na outra extremidade. Isto impõe restrições no tráfego dos tratores, dificultando a logística de deslocamento entre os pontos de carga e transbordo.

4.2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Para a realização da pesquisa, foi feita uma visita em um canavial da cooperativa CE, localizado no Município de Bom Sucesso-PR, no dia 25 de outubro de 2019. A visita foi feita em uma propriedade com área estimada em 60 alqueires, onde foi possível conhecer e mapear o fluxo de operações da colheita de cana-de-açúcar no campo, conforme mostrado na FIGURA 13.

De acordo com a empresa, a capacidade das caçambas utilizadas pelos tratores é de 20 toneladas, e o enchimento dessas caçambas depende da produtividade das linhas de cana-de-açúcar. Além disso, são necessárias aproximadamente três caçambas para carregar um caminhão Romeu-e-Julieta do tipo exibido na FIGURA 21. Também foi observado que a Cooperativa fixa um único ponto de transbordo para cada talhão. Em canaviais com topografia acidentada, o ponto de transbordo é fixado em locais cuja altitude está abaixo da altitude dos pontos de carga, para facilitar o reboque das cargas.

Após a visita de campo realizada no canavial da Cooperativa, foi construído um estudo de caso com dados georreferenciados baseado no talhão de cana visitado. Para isto, usou-se imagens de satélite extraídas do software *QGIS 2.8*.

FIGURA 21 – CAMINHÃO ROMEU-E-JULIETA.



FONTE: Os autores (2021).

5 MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo descreve o modelo matemático proposto para resolver o problema abordado. O modelo de programação linear inteira proposto é uma adaptação do modelo clássico utilizado na resolução do problema de localização de facilidades abordado por (ARENALES et al., 2015).

No modelo original, as facilidades são tratadas como possíveis locais para instalação de fábricas ou centros de distribuição que melhor atendem a demanda dos clientes, levando-se em consideração a localização dos clientes e os custos do transporte. No modelo proposto, os pontos de transbordo foram tratados como facilidades e os pontos de carga como sendo os clientes.

O objetivo do modelo é minimizar o deslocamento total necessário para recolher todas as cargas a partir dos pontos de transbordo disponíveis. Em outras palavras, o modelo determina para qual ponto de transbordo cada carga deve ser enviada, de modo que o deslocamento total dos tratores seja minimizado. Para resolver o modelo, é preciso construir uma matriz de distâncias entre os pontos de cargas e transbordos.

Na sequência, a seção 5.1 descreve o modelo e a seção 5.2 descreve os procedimentos utilizados para construir a matriz de distâncias.

TABELA 2 – NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO.

Notação	Definição
Conjuntos	
C	Conjunto de pontos de carga.
T	Conjunto de pontos de transbordo.
Parâmetros	
d_{ct}	Distância do ponto de carga c ao ponto de transbordo t .
cap	Capacidade dos caminhões em número de cargas. Uma carga equivale a uma caçamba de trator completa (20 toneladas).
PC_{ct}	Pontos que são a primeira carga de um caminhão. Esses pontos são gerados por uma progressão aritmética de razão cap , primeiro termo com valor 1 e contendo $\lceil \frac{ C }{cap} \rceil$ termos.
Variáveis de decisão	
$x_{ct} \in \{0, 1\}$	indica se a carga c é destinada para o ponto de transbordo t .

5.1 MODELO MATEMÁTICO

A formulação matemática do modelo é apresentada abaixo, cujas notações utilizadas estão definidas na TABELA 2.

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar} && \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} d_{ct} x_{ct} && (5.1) \\ &\text{Sujeito a:} && \end{aligned}$$

$$\sum_{t \in T} x_{ct} = 1 \quad \forall c \in C \quad (5.2)$$

$$cap \cdot x_{kt} \leq \sum_{c=k}^{\min\{k+cap-1, |C|\}} x_{ct} \quad \forall k \in PC; t \in T \quad (5.3)$$

$$x_{ct} \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C; t \in T \quad (5.4)$$

A função objetivo (5.1) minimiza a distância total percorrida pelos tratores. A restrição (5.2) garante que toda carga seja rebocada para algum ponto de transbordo. A restrição (5.3) garante que se uma carga k é destinada para um ponto de transbordo t , então as próximas $cap-1$ cargas serão destinadas para o mesmo lugar até encher um caminhão, ou seja, só pode designar um ponto Transbordo para todo ponto de carga. No estudo de caso, $cap = 3$, pois são necessárias três cargas para encher um caminhão do tipo Romeu-e-Julietta.

5.2 MATRIZ DE DISTÂNCIAS

A construção da matriz de distância entre os pontos de carga e transbordos foi realizada em três etapas, que antecedem a execução do modelo.

- Etapa 1: Estimar os pontos de carga com base na produtividade das linhas de cana.
- Etapa 2: Construir um grafo que representa o deslocamento dos tratores entre os pontos de carga e transbordos.
- Etapa 3: Construir a matriz usando as distâncias mínimas entre pontos de carga e transbordo.

Nas seções que seguem, detalhamos cada uma dessas etapas.

5.2.1 Estimação dos pontos de carga

Para estimar os pontos de carga, foi elaborado um mapa georreferenciado do talhão e projetado linhas de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 metros. O mapa, mostrado na FIGURA 18 e FIGURA 19, foi construído a partir das coordenadas UTM do talhão. As linhas de cana foram projetadas com auxílio de um *software CAD*. Depois de projetadas as linhas, as informações foram carregadas para o *software QGIS* e salvas em arquivos *shapefiles*. A partir do *shapefile* das linhas de cana, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem *Python*, utilizando-se a biblioteca *PyQGIS*, capaz de ler as coordenadas dos vértices das linhas e gerar uma estimativa da localização dos pontos de carga, com base em um parâmetro que depende da produtividade das linhas. Isto é, foi usada uma estimativa simples, que é a quantidade de metros que a colhedora precisa percorrer nas linhas de cana, para encher uma caçamba do trator transbordo. Outras estimativas mais elaboradas, baseadas em distribuições estatísticas, podem ser utilizadas, entretanto foi utilizada esta estimativa para simplificar o estudo.

FIGURA 22 – PONTOS DE CARGA ESTIMADOS A CADA 1000 METROS.



FONTE: Os autores (2021).

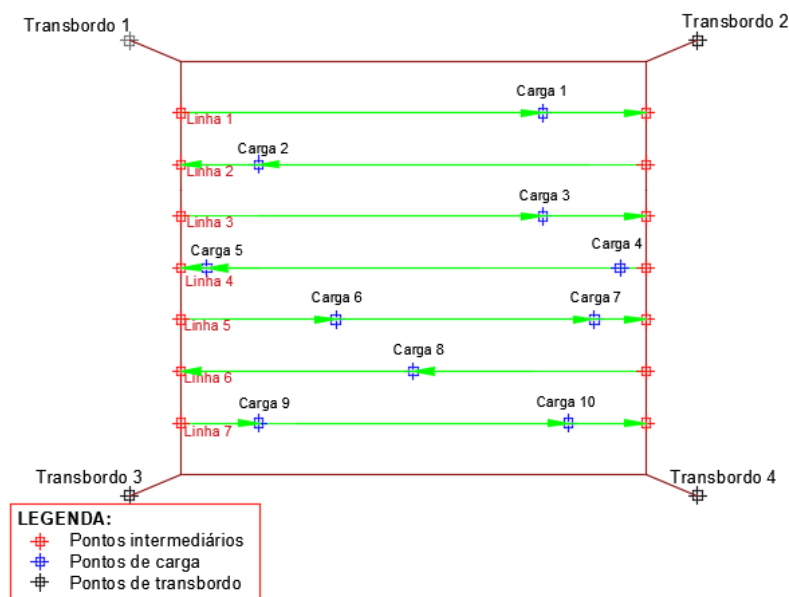
Um algoritmo capaz de estimar os pontos de carga com base na produtividade das linhas é importante, devido ao fato da produtividade do canavial reduzir ao longo das safras. Isto é, até que o canavial seja reformado, é possível que a cada nova safra a colhedora tenha que percorrer uma distância maior para colher a mesma quantidade de cana necessária para encher uma caçamba do trator transbordo. A FIGURA 20 e a FIGURA 22 ilustram a estimativa de pontos de carga, supondo que a colhedora encha uma caçamba a cada 500 metros e a cada 1000 metros, respectivamente.

5.2.2 Construção do grafo de deslocamentos

Para representar o deslocamento realizado pelos tratores entre os pontos de carga e transbordos, foi considerado um grafo orientado, conforme ilustrado na FIGURA 23. Neste grafo, os pontos intermediários são as extremidades das linhas de cana. As arestas em cor verde representam os deslocamentos dentro do talhão. Essas arestas possuem sentido único, e o sentido delas é dado pelo sentido de deslocamento da colhedora. Já as demais aresta possuem sentido duplo.

Nesta etapa, a ideia é gerar a matriz de distâncias do modelo, calculando a distância mínima entre os pontos de carga e transbordos. Isto pode ser feito empregando-se um algoritmo de caminhos mínimos. Durante a pesquisa, testamos esta abordagem, mas ela não funciona.

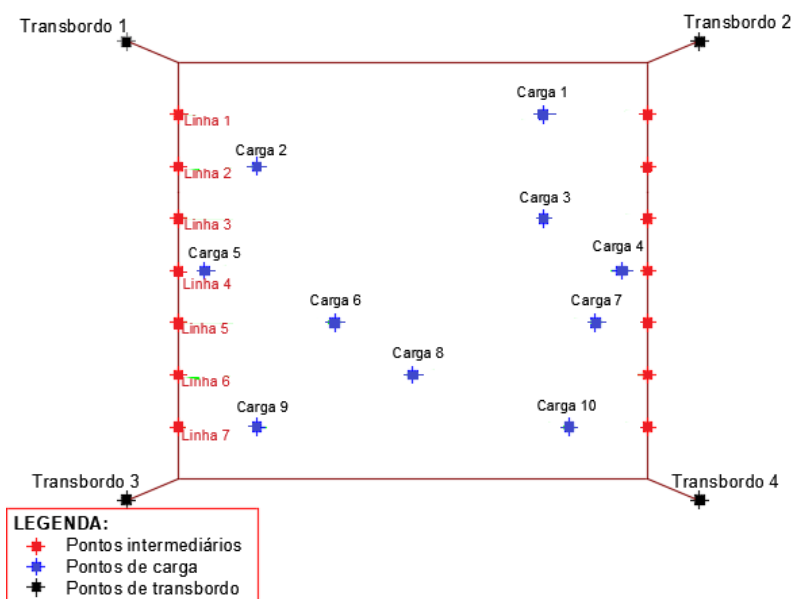
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DO GRAFO QUE DESCREVE O DESLOCAMENTO DOS TRATORES.



FONTE: Os autores (2021).

Ao calcular-se o caminho mínimo que vai de um ponto de carga até um ponto de transbordo, este caminho pode passar várias vezes por dentro do talhão, e isto não é permitido na prática, para não estragar a planta. Para contornar este obstáculo, propomos um grafo simplificado que não contém as arestas verdes, que representam os deslocamentos dentro do talhão. Neste novo grafo, ilustrado na FIGURA 24, a ideia é que a distância de um ponto de carga C_i até um ponto de transbordo T_i é a soma das distâncias mínimas de T_j até as extremidades da linha de cana do ponto de carga C_i . Usando esta estratégia é possível construir a matriz de distâncias do modelo usando um algoritmo de caminhos mínimos.

FIGURA 24 – ILUSTRAÇÃO DO GRAFO SIMPLIFICADO.



FONTE: Os autores (2021).

Nesta fase, foi desenvolvido um segundo algoritmo em *Python*, utilizando a biblioteca *PyQGIS*, que gera todos os pontos intermediários, a partir do *shapefile* das linhas de cana, e armazena esses pontos em um outro *shapefile* que é utilizado na construção do grafo.

5.2.3 Geração da matriz de distâncias para o modelo proposto

Nesta etapa, foi desenvolvido um terceiro algoritmo em *Python*, também utilizando a biblioteca *PyQGIS*, para gerar a matriz do modelo no formato descrito na TABELA 3. O algoritmo lê os *shapefiles* dos pontos de carga, transbordos, pontos intermediários e das arestas de sentido duplo, e gera o grafo simplificado, automaticamente. Depois de gerar o grafo, o algoritmo emprega o algoritmo de caminhos mínimos de *Floyd-Warshall* para calcular as distâncias mínimas entre todos os pares de vértices do grafo simplificado. Após calcular as distâncias mínimas entre todos os pares de vértices, o algoritmo usa essas distâncias mínimas para gerar a matriz do modelo, no formato apresentado na TABELA 3.

Após a geração da matriz do modelo, os dados são salvos em um arquivo em formato *Comma Separated Values* (CSV) e utilizados como entrada para o *script* que executa o modelo.

TABELA 3 – REPRESENTAÇÃO DA MATRIZ DE DISTÂNCIAS DO MODELO.

Cargas	Transbordo			
	1	2	..	T
1	$d_{1,1}$	$d_{1,2}$	..	$d_{1, T }$
2	$d_{2,1}$	$d_{2,2}$	..	$d_{2, T }$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
C	$d_{ C ,1}$	$d_{ C ,2}$	..	$d_{ C , T }$

FONTE: Os autores (2021).

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo descreve os experimentos computacionais realizados com os dados do talhão visitado na cooperativa CE. São apresentados os resultados para três cenários diferentes:

- Cenário 1: O talhão tendo a produtividade de uma carga a cada 250 metros.
- Cenário 2: O talhão tendo a produtividade de uma carga a cada 500 metros.
- Cenário 3: O talhão tendo a produtividade de uma carga a cada 1000 metros.

Todos os experimentos são comparados com o cenário praticado pela cooperativa, em que todas as cargas são enviadas para um único ponto de transbordo.

O modelo foi implementado no solver *GUROBI* 9.0 utilizando-se a interface de programação *Anaconda 3* no *Python 3.7*.

A partir da matriz de distâncias gerada e salva em formato *CSV*, o modelo foi executado utilizando os dados da matriz como entrada.

As análises foram realizadas em um *notebook* com processador Intel Core i3-7020U CPU @ 2GHz e 4GB de memória RAM instalada.

6.1 CENÁRIO 1: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 250 M

Ao rodar o modelo no cenário 1, foi possível obter a designação de cargas para os pontos de transbordos apresentada na TABELA 4.

É possível observar que o modelo designou as cargas somente para três pontos: Transbordo 1, Transbordo 3 e Transbordo 5.

TABELA 4 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 1.

C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
1	1	44	1	87	1	130	5	173	3	216	3	259	3	302	3	345	3
2	1	45	1	88	5	131	5	174	3	217	3	260	3	303	3	346	3
3	1	46	1	89	5	132	5	175	3	218	3	261	3	304	3	347	3
4	1	47	1	90	5	133	1	176	3	219	3	262	3	305	3	348	3
5	1	48	1	91	1	134	1	177	3	220	3	263	3	306	3	349	3
6	1	49	1	92	1	135	1	178	3	221	3	264	3	307	3	350	3
7	1	50	1	93	1	136	5	179	3	222	3	265	3	308	3	351	3
8	1	51	1	94	5	137	5	180	3	223	3	266	3	309	3	352	3
9	1	52	1	95	5	138	5	181	3	224	3	267	3	310	3	353	3
10	5	53	1	96	5	139	5	182	3	225	3	268	3	311	3	354	3
11	5	54	1	97	5	140	5	183	3	226	3	269	3	312	3	355	3
12	5	55	1	98	5	141	5	184	3	227	3	270	3	313	3	356	3
13	1	56	1	99	5	142	1	185	3	228	3	271	3	314	3	357	3
14	1	57	1	100	1	143	1	186	3	229	3	272	3	315	3	358	3
15	1	58	1	101	1	144	1	187	3	230	3	273	3	316	3	359	3
16	1	59	1	102	1	145	5	188	3	231	3	274	3	317	3	360	3

Continua...

TABELA 4 – continuação

C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
17	1	60	1	103	5	146	5	189	3	232	3	275	3	318	3	361	3
18	1	61	1	104	5	147	5	190	3	233	3	276	3	319	3	362	3
19	1	62	1	105	5	148	5	191	3	234	3	277	3	320	3	363	3
20	1	63	1	106	1	149	5	192	3	235	3	278	3	321	3	364	3
21	1	64	1	107	1	150	5	193	3	236	3	279	3	322	3	365	3
22	5	65	1	108	1	151	1	194	3	237	3	280	3	323	3	366	3
23	5	66	1	109	1	152	1	195	3	238	3	281	3	324	3	367	3
24	5	67	1	110	1	153	1	196	3	239	3	282	3	325	3	368	3
25	1	68	1	111	1	154	1	197	3	240	3	283	3	326	3	369	3
26	1	69	1	112	1	155	1	198	3	241	3	284	3	327	3	370	3
27	1	70	1	113	1	156	1	199	3	242	3	285	3	328	3	371	3
28	1	71	1	114	1	157	5	200	3	243	3	286	3	329	3	372	3
29	1	72	1	115	1	158	5	201	3	244	3	287	3	330	3	373	3
30	1	73	1	116	1	159	5	202	3	245	3	288	3	331	3	374	3
31	1	74	1	117	1	160	3	203	3	246	3	289	3	332	3	375	3
32	1	75	1	118	5	161	3	204	3	247	3	290	3	333	3	376	3
33	1	76	1	119	5	162	3	205	3	248	3	291	3	334	3	377	3
34	1	77	1	120	5	163	3	206	3	249	3	292	3	335	3	378	3
35	1	78	1	121	1	164	3	207	3	250	3	293	3	336	3	379	3
36	1	79	1	122	1	165	3	208	3	251	3	294	3	337	3	380	3
37	5	80	1	123	1	166	3	209	3	252	3	295	3	338	3	381	3
38	5	81	1	124	1	167	3	210	3	253	3	296	3	339	3	382	3
39	5	82	1	125	1	168	3	211	3	254	3	297	3	340	3		
40	1	83	1	126	1	169	3	212	3	255	3	298	3	341	3		
41	1	84	1	127	1	170	3	213	3	256	3	299	3	342	3		
42	1	85	1	128	1	171	3	214	3	257	3	300	3	343	3		
43	1	86	1	129	1	172	3	215	3	258	3	301	3	344	3		

FONTE: Os autores (2021).

Legenda: **C** ponto de Carga **T** ponto de Transbordo

No cenário praticado pela cooperativa CE, todas as cargas eram designadas para um único transbordo (Transbordo 2). A TABELA 5 compara essa designação com a designação gerada pelo modelo. Essa comparação mostra que houve uma redução de 20,55% no deslocamento dos tratores em relação ao cenário praticado pela empresa.

TABELA 5 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 1 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRATICADA PELA COOPERATIVA CE.

	Cooperativa	Modelo	Redução
Deslocamento (km)	297,26	236,17	20,55%

FONTE: Os autores (2021).

O *log* de saída do modelo, após ser rodado para gerar a solução do cenário 1, está descrito na FIGURA 25, e leva um tempo computacional de 0,08 s para resolver o problema.

FIGURA 25 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 1.

```

Gurobi Optimizer version 9.1.0 build v9.1.0rc0 (win64)
Thread count: 2 physical cores, 4 logical processors, using up to 4 threads
Optimize a model with 1022 rows, 1910 columns and 3815 nonzeros
Model fingerprint: 0x45169bdd
Variable types: 0 continuous, 1910 integer (1910 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 2e+00]
  Objective range   [1e+02, 1e+03]
  Bounds range      [1e+00, 1e+00]
  RHS range         [1e+00, 1e+00]
Found heuristic solution: objective 302863.90000
Presolve removed 1022 rows and 1910 columns
Presolve time: 0.03s
Presolve: All rows and columns removed

Explored 0 nodes (0 simplex iterations) in 0.05 seconds
Thread count was 1 (of 4 available processors)

Solution count 2: 236171

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 2.361711000000e+05, best bound 2.361711000000e+05, gap 0.0000%

```

FONTE: Os autores (2021).

6.2 CENÁRIO 2: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 500 M

Ao rodar o modelo no cenário 2, foi possível obter a designação de cargas para os pontos de transbordos apresentada na TABELA 6.

É possível observar que o modelo designou as cargas somente para três pontos: Transbordo 1, Transbordo 3 e Transbordo 5. Comparado com a designação utilizada pela Cooperativa (onde todas as cargas eram designadas para o Transbordo 2), TABELA 7 mostra que houve uma redução de 20,57% no deslocamento total dos tratores em relação ao cenário praticado pela empresa.

TABELA 6 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 2.

C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
1	1	26	1	51	1	76	1	101	3	126	3	151	3	176	3
2	1	27	1	52	1	77	1	102	3	127	3	152	3	177	3
3	1	28	1	53	1	78	1	103	3	128	3	153	3	178	3
4	1	29	1	54	1	79	3	104	3	129	3	154	3	179	3
5	1	30	1	55	1	80	3	105	3	130	3	155	3	180	3
6	1	31	1	56	1	81	3	106	3	131	3	156	3	181	3
7	1	32	1	57	1	82	3	107	3	132	3	157	3	182	3
8	1	33	1	58	1	83	3	108	3	133	3	158	3	183	3
9	1	34	1	59	1	84	3	109	3	134	3	159	3	184	3
10	5	35	1	60	1	85	3	110	3	135	3	160	3	185	3
11	5	36	1	61	1	86	3	111	3	136	3	161	3	186	3
12	5	37	5	62	1	87	3	112	3	137	3	162	3	187	3
13	1	38	5	63	1	88	3	113	3	138	3	163	3	188	3
14	1	39	5	64	1	89	3	114	3	139	3	164	3	189	3
15	1	40	1	65	1	90	3	115	3	140	3	165	3	190	3

Continua...

TABELA 6 – continuação

C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
16	1	41	1	66	1	91	3	116	3	141	3	166	3	191	3
17	1	42	1	67	1	92	3	117	3	142	3	167	3		
18	1	43	1	68	1	93	3	118	3	143	3	168	3		
19	1	44	1	69	1	94	3	119	3	144	3	169	3		
20	1	45	1	70	1	95	3	120	3	145	3	170	3		
21	1	46	1	71	1	96	3	121	3	146	3	171	3		
22	5	47	1	72	1	97	3	122	3	147	3	172	3		
23	5	48	1	73	1	98	3	123	3	148	3	173	3		
24	5	49	1	74	1	99	3	124	3	149	3	174	3		
25	1	50	1	75	1	100	3	125	3	150	3	175	3		

FONTE: Os autores (2021).

Legenda: **C** ponto de Carga **T** ponto de Transbordo

TABELA 7 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 2 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRACTICADA PELA COOPERATIVA CE.

	Cooperativa	Modelo	Redução
Deslocamento (km)	148,51	117.96	20.57%

FONTE: Os autores (2021).

O *log* de saída do modelo, após ser rodado para gerar a solução do cenário 2, está descrito na FIGURA 26, e leva um tempo computacional de 0,03 s para resolver o problema.

FIGURA 26 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 2.

```
Gurobi Optimizer version 9.1.0 build v9.1.0rc0 (win64)
Thread count: 2 physical cores, 4 logical processors, using up to 4 threads
Optimize a model with 511 rows, 955 columns and 1910 nonzeros
Model fingerprint: 0xd3fd80a7
Variable types: 0 continuous, 955 integer (955 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 2e+00]
  Objective range   [1e+02, 1e+03]
  Bounds range      [1e+00, 1e+00]
  RHS range         [1e+00, 1e+00]
Found heuristic solution: objective 143169.40000
Presolve removed 511 rows and 955 columns
Presolve time: 0.01s
Presolve: All rows and columns removed

Explored 0 nodes (0 simplex iterations) in 0.02 seconds
Thread count was 1 (of 4 available processors)

Solution count 2: 117965

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 1.179653000000e+05, best bound 1.179653000000e+05, gap 0.0000%
```

FONTE: Os autores (2021).

6.3 CENÁRIO 3: PRODUTIVIDADE DE UMA CARGA A CADA 1000 M

Ao rodar o modelo no cenário 3, foi possível obter a designação de cargas para os pontos de transbordos apresentada na TABELA 8.

É possível observar que o modelo distribuiu as cargas para três pontos: Transbordo 1, 3 e 5, novamente.

TABELA 8 – DESIGNAÇÃO OBTIDA NO CENÁRIO 3.

C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
1	1	15	1	29	1	43	3	57	3	71	3	85	3
2	1	16	1	30	1	44	3	58	3	72	3	86	3
3	1	17	1	31	1	45	3	59	3	73	3	87	3
4	1	18	1	32	1	46	3	60	3	74	3	88	3
5	1	19	1	33	1	47	3	61	3	75	3	89	3
6	1	20	1	34	1	48	3	62	3	76	3	90	3
7	1	21	1	35	1	49	3	63	3	77	3	91	3
8	1	22	5	36	1	50	3	64	3	78	3	92	3
9	1	23	5	37	5	51	3	65	3	79	3	93	3
10	5	24	5	38	5	52	3	66	3	80	3	94	3
11	5	25	1	39	5	53	3	67	3	81	3	95	3
12	5	26	1	40	3	54	3	68	3	82	3		
13	1	27	1	41	3	55	3	69	3	83	3		
14	1	28	1	42	3	56	3	70	3	84	3		

FONTE: Os autores (2021).

Legenda:

C ponto de Carga

T ponto de Transbordo

Comparado com a solução empregada pela Cooperativa, a TABELA 9 mostra que esta solução do modelo reduziu 20,40% no deslocamento total dos tratores em relação ao cenário praticado pela empresa.

TABELA 9 – DESIGNAÇÃO DO MODELO NO CENÁRIO 3 COMPARADO COM A DESIGNAÇÃO PRATICADA PELA COOPERATIVA CE.

	Cooperativa	Modelo	Redução
Deslocamento (km)	73,87	58.80	20,40%

FONTE: Os autores (2021).

O *log* de saída do modelo, para do cenário 3 está descrito na FIGURA 27 e leva um tempo computacional de 0,03 s para resolver o problema.

FIGURA 27 – SAÍDA DO MODELO NO CENÁRIO 3.

```

Gurobi Optimizer version 9.1.0 build v9.1.0rc0 (win64)
Thread count: 2 physical cores, 4 logical processors, using up to 4 threads
Optimize a model with 255 rows, 475 columns and 950 nonzeros
Model fingerprint: 0x66d21908
Variable types: 0 continuous, 475 integer (475 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 2e+00]
  Objective range   [2e+02, 1e+03]
  Bounds range      [1e+00, 1e+00]
  RHS range         [1e+00, 1e+00]
Found heuristic solution: objective 77162.300000
Presolve removed 255 rows and 475 columns
Presolve time: 0.01s
Presolve: All rows and columns removed

Explored 0 nodes (0 simplex iterations) in 0.02 seconds
Thread count was 1 (of 4 available processors)

Solution count 2: 58797.4

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 5.879740000000e+04, best bound 5.879740000000e+04, gap 0.0000%

```

FONTE: Os autores (2021).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi abordado o problema de otimizar o deslocamento de tratores que escoam a cana colhida pela colhedora, de dentro do talhão, para ser transferido para caminhões que fazem o transporte da cana até a usina. Para resolver o problema, foi proposto um modelo de programação linear inteira baseado no problema clássico de localização de facilidades. Para aplicar o modelo, foi preciso desenvolver vários *scripts*, na linguagem *Python*, para construir a matriz do modelo. Esses *scripts* possuem a vantagem de que, dada a planta digital dos talhões em arquivos *shapefiles*, é possível montar a matriz de distâncias do modelo de forma automática, para então rodar o modelo e obter a solução final.

Na abordagem utilizada, foi feita várias simplificações no sentido de tornar a pesquisa possível de ser realizada como um TCC. Por outro lado, acreditamos que essas simplificações não invalidam as contribuições científicas da pesquisa.

Dentre as simplificações feitas, desconsideramos o relevo do terreno. Isto foi motivado pela dificuldade em obter um modelo digital de terreno contendo os dados de altitudes. Em outras palavras, no nosso estudo foi considerado apenas as distâncias planas. Uma outra simplificação feita, foi considerar que a operação de colheita é realizada apenas por uma colhedora e um trator transbordo. Por outro lado, algumas operações de colheita podem envolver mais de uma colhedora e trator transbordo. Entretanto, essa simplificação foi necessária para tornar o modelo menos complexo e possível de ser formulado dentro de um trabalho de TCC. Um terceira simplificação assumida, foi o método de estimação dos pontos de carga. Nesta pesquisa, foi empregado uma distribuição uniforme, com intuito de viabilizar a execução do modelo.

Apesar das simplificações, os resultados atingidos são animadores e sugerem que é possível melhorar o processo de corte e carregamento da cana-de-açúcar, empregando ferramentas da Pesquisa Operacional. Esta pesquisa não possui contribuições prática imediatas, mas acreditamos que ela possua relevância científica. Pois nossa revisão de literatura mostrou que a otimização da colheita de cana-de-açúcar ainda é um tema pouco explorado na literatura. No que diz respeito ao deslocamento dos tratores, não encontramos qualquer trabalho sobre o assunto. Sendo assim, acreditamos que este estudo, embora simplificado, sirva como ponto de partida para o desenvolvimento de modelos mais realistas, cujos resultados terão maior aplicabilidade prática.

Como possíveis extensões deste trabalho, destacamos: i) o desenvolvimento de um modelo estatístico de distribuição de probabilidade para representar melhor a produtividade dos canaviais, ii) a extensão do modelo proposto para considerar a colheita com mais de uma colhedora e mais de um trator transbordo, e iii) extensão do modelo para considerar o relevo do terreno, de modo a diferenciar o reboque de cargas em regiões planas, aclives e declives.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Marcelo; MAURI, Geraldo; SILVA, Rodrigo Freitas. **Introdução aos Métodos Heurísticos de otimização com Python**. [S.l.]: CAUFES, 2018. ISBN 978-85-61890-99-5. Citado 2 vez na página 31.

ARENALES, Marcos et al. **Pesquisa operacional**. Edição: GEN LTC. 2. ed. [S.l.]: jun.19, 2015. ISBN 9788535271614. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 41.

ASSOCIAÇÃO DE PRODUTORES DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ - ALCOPAR. Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná. [S.l.], 2011. : <http://www.alcopar.org.br/>. Acesso em: 3 jan. 2020. Citado 4 vezes nas páginas 20–22.

BARCELOS, Bartholomeo Oliveira; EVANGELISTA, Mário Luiz Santos; SEGATTO, Sara Schafer. A importância e a aplicação da pesquisa operacional nos Cursos de graduação em Administração. **RACE - Revista de Administração, Contabilidade e Economia**, v. 11, n. 2, jul. 2012. Citado 1 vez na página 29.

BEZERRA, Heloísa. **Introdução a Pesquisa Operacional (Teoria de Prática)**. <https://www.passeidireto.com/arquivo/6073740/pesquisa-operacional-completa>, 2011. Citado 0 vez na página 30.

BRASIL. SENADO FEDERAL. Decreto nº 76.593, de 14 de dezembro de 1975 . Institui o Programa Nacional do Alcool e das outras Providencias. **Secretaria de Informação Legislativa**, p. 15257, col. 1, 1975. Norma revogada expressamente. Veja mais informações em "Normas posteriores". : <http://legis.senado.leg.br/norma/499233>. Acesso em: 15 mai. 2020. Citado 1 vez na página 20.

CANAVIEIROS, IvSoN Máquina. **Safra 2019/2020 Usina São José frente 3 carregamento de cana carregadeira**. [S.l.: s.n.], dez. 2019. : <https://www.youtube.com/watch?v=00XSsLFoSiE>. Acesso em: 15 mai. 2020. Citado 0 vez na página 26.

CARDOZO, Nilceu Piffer; SENTELHAS, Paulo Cesar. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 6, nov. 2013. ISSN 1678-992X. Citado 1 vez na página 15.

CASTRO, Selma Simões et al. Estudo Da Expansão Da Cana-de-açúcar No Estado De Goiás: Subsídios Para Uma Avaliação Do Potencial De Impactos Ambientais. **Boletim Goiano de Geografia**, Universidade Federal de Goiás, v. 30, n. 1, 2007. p. 9–17, ago. 2007. DOI: 10.5216/bgg.v30i1.11203. Citado 2 vez na página 14.

CAVALCANTE, Rodrigo. Apostila de Introdução ao SIG. Minas Gerais. [S.l.], mai. 2015. Citado 1 vez na página 29.

CURSOS CPT. **Curso Cultivo de Cana-de-açúcar para Produção de Cachaça - Colheita**. [S.l.: s.n.], 2012. : <https://www.youtube.com/watch?v=>. Acesso em: 17 abr. 2020. Citado 0 vez na página 25.

DAVIS, Mark. **Fundamentos da administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 2001. ISBN 9788573075243. Citado 1 vez na página 29.

EVANS, James R. Structural analysis of local search heuristics in combinatorial optimization. **Computers and Operations Research**, v. 14, 465–477 p, 1987. Citado 2 vez na página 31.

FLORENTINO, Helenice Oliveira et al. Otimização Da Colheita Da Cana-de-açúcar. **Anais do XLVIII SBPO**, p.634–642, set. 2016. Citado 1 vez na página 15.

GIL, Antônio. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008. ISBN 9788522451425. Citado 5 vez na página 36.

GOES, Tarcizio; MARRA, Renner; SILVA, Geraldo Souza e. Setor Sucroalcooleiro no Brasil Situação Atual e Perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, v. 17, N.2, 2008. Citado 2 vez na página 14.

GRISOTTO, Marcilio Egidio. **Otimização Do Transporte De Cana-de-açúcar por Caminhões**. 1995. Diss. (Mestrado) – UNICAMP. Título de Mestre em Matemática Aplicada. Citado 7 vezes nas páginas 27, 35.

JUNQUEIRA, Rogério Ávila Ribeiro; MORABITO, Reinaldo. Programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar: modelo e métodos de solução para problemas de grande porte. **Gestão & Produção**, FapUNIFESP (SciELO), v. 25, n. 1, p. 132–147, out. 2017. DOI: 10.1590/0104-530x2647-16. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34.

LOURENÇO, Gilmar Mendes. Economia Paranaense: Restrições Conjunturais E Avanços Estruturais. **Revista da FAE**, v. 2, N.3, 1999. Citado 1 vez na página 20.

RAMESCH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 2000. Citado 1 vez na página 15.

RANGEL, João José Assis et al. Modelo De Simulação Para O Sistema De Corte, Carregamento E Transporte De Cana-de-açúcar: Um Estudo De Caso No Estado Do Rio De Janeiro. **VÉRTICES**, v. 11, n. 1/3, p. 43–54, jan. 2009. Citado 1 vez na página 27.

RODRIGUES, Achilles. **4 ações vitais para otimizar a logística da colheita de cana, maximizar a eficiência e reduzir os custos**. [S.l.: s.n.], 2020. : <https://bit.ly/36vLSZs>. Acesso em: 2 abr. 2020. Citado 0 vez na página 26.

SANTORO, Ever. **Otimização da rota na colheita mecanizada da cana-de-açúcar**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Citado 6 vezes nas páginas 34, 35.

SHIKIDA, Pery. **A dinâmica tecnológica da agroindústria canavieira do Paraná : estudos de caso das Usina Sabarálcool e Perobálcool**. Cascavel: EDUNIOESTE, 2001. ISBN 8586571474. Citado 2 vezes nas páginas 20, 21.

SILVA, Fernando Igor Campos; GARCIA, Anice. Colheita Mecânica e Manual da Cana-de-açúcar. **Nucleus**, Fundacao Educational de Ituverava, v. 6, n. 1, p. 133–247, abr. 2009. DOI: 10.3738/1982.2278.149. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25.

SILVA, Helenice de Oliveira Florentino; ISLER, Paulo Roberto et al. Modelo Matemático para plantio e colheita da cana-de-açúcar. **Anais do Congresso de Matemática Aplicada e Computação (CMAC Sudeste 2013)**, p. 6, 2013. ISSN 2237-7166. Citado 9 vezes nas páginas 32, 33.

SILVER, Edward A. et al. **A tutorial on heuristic methods**. [S.l.]: Elsevier BV, set. 1980. v. 5, p. 153–162. DOI: 10.1016/0377-2217(80)90084-3. Citado 2 vez na página 31.

TECNOLOGIA, FCN. **CENTRACANA - Inovação de cana inteira (HD)**. [S.l.: s.n.], 2015. : <https://www.youtube.com/watch?v=i0vph-kkspM>. Acesso em: 27 mai. 2020. Citado 0 vez na página 25.

TIWARI, N. K. **Operations research**. Place of publication not identified: Prentice-Hall Of India Pv, 2007. v. 19. ISBN 9788120329669. Citado 2 vez na página 29.

VIDAL, Maria de Fátima; SANTOS, Ailton N; SANTOS, Marcus Antônio. **Cadeia Produtiva da Indústria Sucroalcoodeira (Cenários Econômicos e Estudo Setoriais)**. <https://bit.ly/33ttWg6>: [s.n.], 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19.