

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS NA  
AGRICULTURA**

**ALFRED FÖRSTER JUNIOR**

**ORIENTADOR: PROF. DR. EDILSON REIS RODRIGUES KATO**

São Carlos - SP  
Fevereiro/2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS NA  
AGRICULTURA**

**ALFRED FÖRSTER JUNIOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração: Inteligência Artificial.  
Orientador: Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato

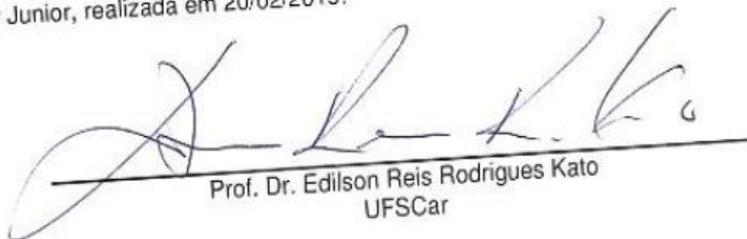
São Carlos - SP  
Fevereiro/2019



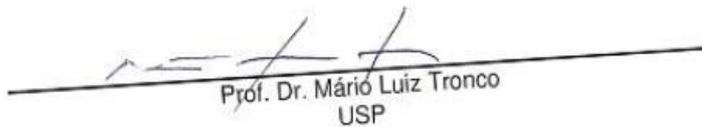
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**Folha de Aprovação**

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alfred Forster Junior, realizada em 20/02/2019:

  
Prof. Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato  
UFSCar

  
Profa. Dra. Marcela Xavier Ribeiro  
UFSCar

  
Prof. Dr. Mário Luiz Tronco  
USP

*Dedico este trabalho especialmente a  
Denise Aparecida Mazi - in memoriam,*

*Dedico também a todos aqueles que  
acreditam que a melhor maneira de se  
mudar o mundo é através da educação  
e a todos aqueles que tiveram seus  
sonhos interrompidos e não puderam  
realiza-los*

# AGRADECIMENTO

É uma árdua tarefa tentar nomear a todos que contribuíram de alguma forma, diretamente ou indiretamente, na realização deste trabalho. Porém, há pessoas que não poderia deixar de citar.

Agradeço imensamente ao professor Dr Edilson Reis Rodrigues Kato, que me orientou durante esta caminhada, motivando sempre que necessário, auxiliando em tudo que preciso.

Principalmente, agradeço a meus pais Alfred e Matilde pelos ensinamentos que escola ou universidade nenhuma fornece e a minha irmã Thais pelo apoio incondicional.

Também agradeço ao Dr Mark Spekken, pela sua imensa contribuição, tanto com suas publicações, quanto a presteza em me auxiliar com as dúvidas.

Não poderia deixar de citar os professores Dr Aguinaldo Lenine Alves e Dr Rubens Barbosa Filho, que além de professores durante a graduação, tornaram-se amigos e nos momentos de dificuldades durante a realização deste trabalho, me auxiliaram.

À Bruna Mussi Just, pelo conselho inicial que me levou a decidir iniciar o mestrado.

Em especial, agradeço a querida amiga Denise Aparecida Mazi – in memoriam, a qual dedico este trabalho, pelo imenso apoio, carinho e força que me passou durante os poucos, mas os melhores meses que pude desfrutar de sua amizade. Onde estiver, saiba, sua motivação sempre foi importante durante esta caminhada e mesmo após sua partida senti sua presença nos momentos de dificuldades, e também sei que ai de cima sempre deu um “jeitinho” de me auxiliar. A ti meus mais sinceros agradecimentos

As amigadas que São Carlos me trouxe, e que levarei para a vida. A Ana Braatz, e nossas conversas, os estudos e a arte culinária. A Francielly e os momentos de descontração e risadas.

A todos amigos que em momentos de fraqueza, de uma forma ou de outra estavam lá e não me deixaram fraquejar, em especial a Bruna Hamine.

Deixo minha gratidão a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio fornecido durante o mestrado, tornando assim possível a realização de um sonho.

Aos professores do programa de pós-graduação em Ciência da Computação do Departamento de Computação da UFSCAR e todos os técnicos administrativos e demais funcionários.

Enfim, agradeço a todos que de uma maneira ou outra contribuíram nem que seja com uma palavra de incentivo.

*Comece fazendo o necessário, depois  
o que é possível e de repente estará  
fazendo o impossível.*

*(São Francisco de Assis)*

*Quando acho que cheguei ao ponto  
máximo, descubro que é possível  
supera-lo.*

*(Ayrton Senna)*

# RESUMO

Este trabalho apresenta um método que busca minimizar a distância percorrida durante a manobras realizadas nas cabeceiras e com isso os gastos com combustível e compactação do solo. Ele se assemelha ao problema de roteamento de veículos capacitivo, que é baseado no problema do caixeiro-viajante, classificado como um problema NP-Difícil devido sua grande complexidade e quantidade de soluções possíveis, complexidade esta que o problema aqui tratado também é classificado. Devido a isso utiliza-se a metaheurística de Otimização por Nuvem de Partículas sendo auxiliada na busca da solução pela metaheurística de Otimização por Colônia de Formigas, além disso é utilizado em alguns casos a estratégia de se realizar a permutação de indivíduos a fim de se realizar uma melhoria local. Por ser um tema de muita relevância, há muitos estudos já realizados, o que possibilitou a comparação do método proposto com outro estudo realizado anteriormente e de fundamental importância no tema. Esta comparação mostrou a viabilidade do método proposto além de mostrar a possibilidade de se utilizar para campos de diversos tamanhos e implementos que já utilizam tecnologia atual ou implementos mais antigos.

**Palavras-chave:** Tráfego Controlado, Agricultura, Otimização por Metaheurísticas, Otimização por Nuvem de Partículas, Otimização por colônia de formigas, PSO, ACO, Compactação do solo, Otimização de percursos

# ABSTRACT

This paper presents a method that seeks to minimize the distance traveled during maneuvers at the headland and thus spending on fuel and soil compaction. It resembles the problem capacitive vehicle routing problem, which is based on the traveling salesman problem, classified as a NP-Hard problem due to their complexity and number of possible solutions, this complexity that the problem treated here is also classified. Due to this it is used the metaheuristic Particle Swarm Optimization being subsidiary in the search of the solution by the Metaheuristics of Ant Colony Optimization, in addition it is used in some cases the strategy to realize the permutation of individuals in order to realize local improvement. To be a matter of great relevance, there are many studies already carried out, which enabled the comparison of the proposed method with another study previously and of fundamental importance in the theme. This comparison showed the viability of the proposed method besides showing the possibility of being used for fields of various sizes and implements that already use current technology or older implements.

**Keywords:** Controlled Traffic Farm, Agriculture, Metaheuristics Optimization, Particle Swarm Optimization, PSO, Ant Colony Optimization, ACO, Soil Compaction, Path Optimization

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de compactação do solo, onde pode ser visualizada pelo menos 4 marcas visíveis de pneus .....	14
Figura 2: Camadas compactadas do solo que pode ser visualizada 6 camadas compactadas.....	16
Figura 3: Adaptação da representação da divisão do campo durante a realização de uma atividade agrícola .....	21
Figura 4: Tipo de manobras de cabeceira mais comuns utilizadas nos campos agrícolas .....	24
Figura 5: Classificação das abordagens Heurísticas .....	26
Figura 6: Adaptação do Pseudocódigo do PSO .....	29
Figura 7: Adaptação do experimento da ponte dupla realizado por Deneubourg et al .....	31
Figura 8: Adaptação do experimento realizado por Goss et al (1989) .....	32
Figura 9: Mapa com a Localização das áreas monitoradas durante o estudo realizado em múltiplas regiões da Austrália .....	38
Figura 10: Local da área experimental utilizada localizado na cidade de Felton no estado de Queensland .....	39
Figura 11: Localização da fazenda experimental da Universidade Aristóteles de Salonica localizada no norte da Grécia que foi utilizado três campos que a dimensão do campo “1” é de 50x80m <sup>2</sup> , o campo “2” possui a dimensão de 30x40m <sup>2</sup> e o campo “3” possui dimensão de 30x70m <sup>2</sup> .....	40
Figura 12: Campo utilizado no experimento de colheita localizado no estado de Mato Grosso do Sul .....	41
Figura 13: Rota otimizada encontrada para uma operação de colheita sem máquinas auxiliares durante o experimento.....	42
Figura 14: Campo experimental localizado na cidade de Wageningen, Holanda também utilizado no experimento.....	42
Figura 15: Rota otimizada a partir da pesquisa realizadas utilizando o campo experimental localizado na Holanda.....	43
Figura 16: Três campos localizados no município de Pradópolis-SP utilizados no experimento .....	44
Figura 17: Campo convexo localizado no centro de pesquisa de Foulum utilizado no experimento .....	46

Figura 18: Campo não convexo que se localiza no norte de Jutlândia utilizado no experimento .....	46
Figura 19: Comparação da solução apresentada em Bochtis e Vougioukas (2008) (a) e a solução do problema proposta por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) (b) .....	48
Figura 20: Comparação da abordagem proposta por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) (a) com a proposta por Conesa-muñoz et al (2016) (b) .....	49
Figura 21: Campo de experimento denominado A Localizado na Dinamarca, mais precisamente no centro de Pesquisa de Foulum .....	50
Figura 22: Rota otimizada gerada pelo algoritmo para o campo denominado A do centro de pesquisa de Foulum, Dinamarca .....	50
Figura 23: Campo experimental B da pesquisa realizada no campo de experimentos de Foulum localizado na Dinamarca .....	51
Figura 24: Rota otimizada no campo B da pesquisa realizada Dinamarca utilizando metaheurística .....	51
Figura 25: Campo denominado A utilizado na experiencia que utiliza latitude, longitude e altitude .....	52
Figura 26: Campo denominado B utilizado no experimento que utilizou Algoritmos Genéticos .....	53
Figura 27: Campos experimentais do Centro de pesquisa C. Oram Little, da universidade do Kentucky .....	54
Figura 28: Campo experimental localizado no Condado de Logan .....	55
Figura 29: Região de Douro em Portugal utilizada no estudo que utilizou para resolução o Algoritmo A-Estrela .....	56
Figura 30: Região da área utilizada no estudo realizado na China, na cidade de Tangji .....	56
Figura 31: Parte das áreas fragmentadas do campo utilizado o método de Busca-Tabu hibrida .....	57
Figura 32: Continuação dos Campos utilizados no estudo que utilizou a Busca-Tabu Hibrida para o processo de colheita .....	57
Figura 33: Campos experimentais da Universidade de Wageningen na Holanda ....	58
Figura 34: Fluxograma do passo a passo de execução do método implementado ...	64
Figura 35: Raio mínimo de giro do veículo, utilizando a geometria de Ackerman .....	65
Figura 36: Fluxograma do processo obtenção da angulação e coordenada das trilhas paralelas .....	67
Figura 37: Fluxograma do processo de obtenção da rota otimizada .....	70

Figura 38: Campo utilizado para testes que possui 155 hectares, sendo parte de uma fazenda localizada na região sul do estado de Mato Grosso do Sul .....	75
Figura 39: Sítio que possui 36ha localizado na região Sudoeste do estado de Mato Grosso do Sul. ....	76
Figura 40: Gráfico do Boxplot das execuções com a distância de não trabalho do campo com dimensões 24x30m .....	80
Figura 41: Gráfico do Boxplot das execuções com a distância total do campo com dimensões 24x30m .....	80
Figura 42: Gráfico de convergência da 1ª Execução do teste com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	80
Figura 43: Gráfico de convergência da 2ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	80
Figura 44: Gráfico de convergência da 3ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 45: Gráfico de convergência da 4ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 46: Gráfico de convergência da 5ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 47: Gráfico de convergência da 6ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 48: Gráfico de convergência da 7ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 49: Gráfico de convergência da 8ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	81
Figura 50: Gráfico de convergência da 9ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	82
Figura 51: Gráfico de convergência da 10ª Execução com o campo com dimensão 24x30m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	82
Figura 52: Boxplot que mostra as distâncias de não trabalho do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	83
Figura 53: Boxplot com os valores das distancias totais do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	83
Figura 54: Gráfico de convergência encontrado na 1ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84
Figura 55: Gráfico de convergência encontrado na 2ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84

Figura 56: Gráfico de convergência encontrado na 3ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84
Figura 57: Gráfico de convergência encontrado na 4ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84
Figura 58: Gráfico de convergência encontrado na 5ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84
Figura 59: Gráfico de convergência encontrado na 6ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	84
Figura 60: Gráfico de convergência encontrado na 7ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	85
Figura 61: Gráfico de convergência encontrado na 8ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	85
Figura 62: Gráfico de convergência encontrado na 9ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	85
Figura 63: Gráfico de convergência encontrado na 10ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	85
Figura 64: Boxplot com os valores das distâncias de não trabalho do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	86
Figura 65: Boxplot com os valores totais das execuções do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	86
Figura 66: Gráfico de convergência da 1ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 67: Gráfico de convergência da 2ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 68: Gráfico de convergência da 3ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 69: Gráfico de convergência da 4ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 70: Gráfico de convergência da 5ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 71: Gráfico de convergência da 6ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	87
Figura 72: Gráfico de convergência da 7ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	88
Figura 73: Gráfico de convergência da 8ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008).....	88

Figura 74: Gráfico de convergência da 9ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	88
Figura 75: Gráfico de convergência da 10ª execução do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008) .....	88
Figura 76: Boxplot da distância total encontrada nos testes do campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	89
Figura 77: Boxplot da distância de não trabalho encontrada nos testes do campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	89
Figura 78: Gráfico de Convergência da 1ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 79: Gráfico de Convergência da 2ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 80: Gráfico de Convergência da 3ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 81: Gráfico de Convergência da 4ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 82: Gráfico de Convergência da 5ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 83: Gráfico de Convergência da 6ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	90
Figura 84: Gráfico de Convergência da 7ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	91
Figura 85: Gráfico de Convergência da 8ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	91
Figura 86: Gráfico de Convergência da 9ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	91
Figura 87: Gráfico de Convergência da 10ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha .....	91

Figura 88: Parte do Sítio Localizado no Estado de Mato Grosso do Sul que é dividido em dois talhões para o cultivo .....	92
Figura 89: Delimitação da área do talhão 1 com a exemplificação da direção de trabalho .....	92
Figura 90: Boxplot com os valores das distâncias de não trabalho encontrado nos testes realizados no sítio localizado no estado de Mato Grosso do Sul na parte que possui cerca de aproximadamente 3,7ha .....	93
Figura 91: Boxplot com os valores totais das execuções encontrados nos testes realizados na área que possui cerca de 3,7ha do sítio localizado no estado de Mato Grosso do Sul .....	93
Figura 92: Gráfico de convergência da 1ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 93: Gráfico de convergência da 2ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 94: Gráfico de convergência da 3ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 95: Gráfico de convergência da 4ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 96: Gráfico de convergência da 5ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 97: Gráfico de convergência da 6ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	94
Figura 98: Gráfico de convergência da 7ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	95
Figura 99: Gráfico de convergência da 8ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	95
Figura 100: Gráfico de convergência da 9ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	95
Figura 101: Gráfico de convergência da 10ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sítio de 36ha localizado no MS.....	95
Figura 102: Talhão maior que possui cerca de 23ha que faz parte do sítio de 36ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul.....	96
Figura 103: Boxplot da distância total encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sítio de 36ha.....	97
Figura 104: Boxplot da distância de não trabalho encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sítio de 36ha.....	97

Figura 105: Gráfico de Convergência da 1ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	97
Figura 106: Gráfico de Convergência da 2ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	97
Figura 107: Gráfico de Convergência da 3ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	97
Figura 108: Gráfico de Convergência da 4ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	97
Figura 109: Gráfico de Convergência da 5ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 110: Gráfico de Convergência da 6ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 111: Gráfico de Convergência da 7ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 112: Gráfico de Convergência da 8ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 113: Gráfico de Convergência da 9ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 114: Gráfico de Convergência da 10ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha.....	98
Figura 115: Comparação entre os boxplots das execuções realizadas .....	101

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos Artigos Relacionados.....	60
Tabela 2: Resultados obtidos no teste com o campo de 24x30m <sup>2</sup> da proposta de Bochtis e Vougioukas (2008).....	79
Tabela 3: Resultados das execuções do campo com dimensão 30x40m <sup>2</sup> do estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008) .....	83
Tabela 4: Resultados detalhados das execuções do teste com o campo com dimensões 30x70m <sup>2</sup> do estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2018).....	86
Tabela 5: Resultados obtidos no teste realizado utilizando o campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul com 155 ha.....	89
Tabela 6: Resultados dos testes realizados no talhão menor com área de aproximadamente 3,7ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul .	93
Tabela 7: Resultados encontrados durante os testes realizados na área que possui cerca de 23ha, parte do sitio de 36ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul .....	96
Tabela 8: Comparação dos Resultados encontrados pela abordagem apresentadas nesse método com a abordagem apresentada no estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008).....	100

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABC</b>	Artificial Bee Colony
<b>ACO</b>	Ant Colony Optimization
<b>AD HOC</b>	Para esta finalidade
<b>CVRP</b>	Capacited Vehicle Routing Problem
<b>NP-DIFÍCIL</b>	Problema de resolução não polinomial
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization
<b>RHEA</b>	Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management
<b>AS</b>	Simulated Annealing

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Motivação.....	15
1.2 Objetivo.....	18
1.3 Organização do Trabalho.....	18
<b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS .....</b>	<b>19</b>
2.1 Problema do Roteamento de Veículos .....	22
2.2 Manobras de cabeceiras .....	23
2.3 Heurística.....	25
2.4 Metaheurística .....	26
2.4.1 Enxame de partículas (PSO).....	28
2.4.2 Colônia de Formigas (ACO) .....	30
2.5 Considerações Finais.....	34
<b>CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>36</b>
3.1 As primeiras pesquisas .....	36
3.2 A utilização na Austrália .....	37
3.3 A otimização da distância nas cabeceiras .....	39
3.4 Os experimentos no Brasil .....	41
3.5 A utilização de metaheurísticas .....	45
3.6 A utilização de múltiplos implementos.....	53
3.7 Outros estudos.....	55
3.8 Considerações Finais.....	59
<b>CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO .....</b>	<b>62</b>
4.1 O Processo da implementação .....	62
4.2 Modelo Conceitual .....	63
4.2.1 Dados de Entrada .....	65
4.2.2 Gerar a direção de trabalho e as trilhas paralelas .....	66
4.2.3 Calculo da matriz de distância.....	68
4.2.4 Obtenção da Rota otimizada .....	68
4.2.5 Dados de Saída .....	71

4.3 Ferramentas utilizadas .....	71
4.4 Método Implementado.....	71
4.5 Testes e Validação.....	74
4.6 Considerações Finais.....	76
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
5.1 Testes com os Campos definidos em Bochtis e Vougioukas (2008) .....	78
5.1.1 Campo 24x30m <sup>2</sup> .....	79
5.1.2 Campo 30x40m <sup>2</sup> .....	82
5.1.3 Campo 30x70m <sup>2</sup> .....	85
5.2 Talhão de 155 hectares.....	88
5.3 Sitio com área de 36 hectares.....	91
5.3.1 Talhão 1 .....	92
5.3.2 Talhão 2 .....	95
5.4 Considerações Finais.....	99
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
6.1 Trabalhos Futuros .....	104
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

As inovações na agricultura estão presentes praticamente desde o início do cultivo pelo homem. Mais recentemente essas inovações estão se tornando cada dia mais tecnológicas, com implementos cada vez maiores, mais pesados e, claro, mais modernos e avançados, visando o aumento da produtividade em conjunto com a redução de custos, no entanto, essas inovações não se apresentam isentas de consequência, com elas surgem diversos problemas. Dentre estes problemas, podemos destacar a compactação do solo e a queima desnecessária de combustível fóssil.

A compactação do solo é um dos grandes desafios da agricultura contemporânea, destacando-se como um dos fatores prejudiciais à produtividade. Ela restringe as funções e o crescimento das raízes, reduzindo assim o rendimento da cultura (GASSO et al., 2013). Com isso, há uma diminuição na acessibilidade das raízes aos nutrientes, causando assim uma maior perda de nutrientes. Além da perda de nutrientes, também ocorre a perda de agroquímicos através do escoamento. Outro fator causado é o aumento das emissões de gases causadores do efeito estufa, por exemplo, óxido nitroso. Segundo Gasso et al (2013) em 1991 foi estimada no mundo uma área agrícola de 68 milhões de hectares com compactação prejudicial do solo e cerca de 50% localiza-se na Europa.

A compactação do solo causada pelo trânsito de máquinas agrícolas é um processo realizado pelas rodas das máquinas, onde as partículas do solo são reajustadas aumentando a densidade aparente do solo (GASSO et al., 2013), atingindo toda a dimensão do campo uma vez que não sendo definido os locais de passagem do maquinário, eles trafegam por toda extensão do campo e diversos sentidos. Na **Figura 1** é apresentado um exemplo de compactação severa causada

por pneus, onde podem ser visualizados ao menos quatro conjuntos de marcas, e que o solo superficial foi lavado, evidenciando o motivo da inexplicável diminuição do rendimento por vários anos.

**Figura 1: Exemplo de compactação do solo, onde pode ser visualizada pelo menos 4 marcas visíveis de pneus**



**Fonte: TULLBERG; YULE; MCGARRY, 2007).**

Outra preocupação é a diminuição dos custos da produção, permitindo com que os alimentos cheguem ao consumidor com preços acessíveis e haja o aumento da lucratividade para o produtor. Uma forma direta de diminuição dos custos da produção é a redução do consumo de combustível necessário à atividade agrícola. A diminuição da quantidade de combustível também contribui diretamente na melhoria das condições de vida do ser humano, pois a maioria dos combustíveis utilizados na agricultura é de origem fóssil, o que contribui para a diminuição do efeito estufa e melhora das condições de vida do planeta.

Uma das maneiras de se diminuir a compactação do solo e o gasto de combustível pelo maquinário é o controle de tráfego agrícola. Ele busca reduzir os efeitos adversos da mecanização agrícola, separando as zonas de tráfego daquela onde há o crescimento de plantas e concentra a passagem dos pneus tornando menor a área submetida ao intenso tráfego agrícola, embora essa área seja mais intensamente utilizada. Há pouco tempo a prática foi introduzida no Brasil, porém já é amplamente utilizada em países como a Austrália e visa reduzir os impactos da compactação do solo (ROQUE et al., 2010).

O controle de tráfego agrícola favorece o desenvolvimento radicular e desenvolvimento das culturas, já que preserva as características do solo nas áreas não trafegadas (SOUZA et al., 2012). O controle de tráfego ainda proporciona

melhor qualidade física do solo e redução no consumo de combustível, devido a uma menor resistência à ruptura do solo na passagem de implementos de imobilização e melhora o potencial de tração do solo, o que provoca um aumento no rendimento da tração como consequência do tráfego de maquinário em solo mais firme (ROQUE et al., 2010).

Para que o tráfego controlado seja mais eficiente não é necessária apenas a habilidade do operador, mas também um ajuste preciso das bitolas e padronização dos espaçamentos e alguns equipamentos que garantam que os maquinários trafeguem apenas na área destinada ao tráfego, de forma perfeita (MOLIN et al., 2011).

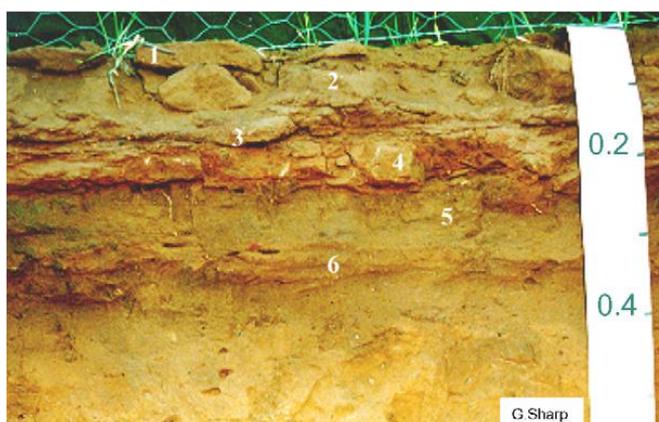
## 1.1 Motivação

A utilização de máquinas agrícolas, como tratores, colheitadeiras, pulverizador, dentre outros; são indispensáveis no processo agrícola, porém com o passar dos anos esses maquinários e os demais implementos agrícolas tiveram um aumento no tamanho e no peso, sendo necessária a manutenção da relação peso/altura. Na Dinamarca o peso médio de um trator em 1970 era de 2,6 toneladas, passando para 6,6 em 2000 (GASSO et al., 2013). No entanto, não houve um aumento proporcional no tamanho e largura do pneu, aumentando assim o consumo de combustível e o risco da compactação do solo como resultado das alterações significativas nas propriedades físicas do solo. Nos implementos comercializados no Brasil, geralmente são utilizados os pneus de banda diagonal, ou seja, eles contêm uma parte lateral rígida, que impede que ele se molde de acordo com a irregularidade do solo, ficando com sua área de contato reduzida e aumentando a pressão na superfície do solo (RICHART et al., 2005)

Segundo Richart et al (2005), estudos demonstram que a compactação do solo possui efeitos tanto benéficos como prejudiciais, sendo que entre os benefícios podem ser apontados o contato solo-semente e o aumento da umidade nos anos de pouca precipitação de chuvas. Também apontam que os efeitos da compactação quando ela é superficial, podem ser minimizados com o preparo do solo para o cultivo. No entanto, a compactação do solo não atinge somente a camada superficial

do solo, atingido diversas camadas do subsolo. A Figura 2 mostra as camadas do subsolo compactadas (TULLBERG; YULE; MCGARRY, 2007).

**Figura 2: Camadas compactadas do solo que pode ser visualizada 6 camadas compactadas**



**Fonte: TULLBERG; YULE; MCGARRY, 2007)**

Os efeitos causados no subsolo podem ser atenuados apenas com a realização do processo de subsolagem, porém não possui caráter permanente devido as características da subsolagem (RICHART et al., 2005). No entanto com a adoção do plantio direto, houve uma diminuição do processo de revolvimento do solo e aumento do tráfego de veículos de maneira descontrolada, influenciando de forma negativa a condição do solo.

A compactação pode ocorrer por causa da perturbação vertical do solo, que acontece devido ao peso da máquina do solo e perturbação horizontal do solo que ocorre devido as alterações na direção da viagem, ocorridas principalmente nas cabeceiras, provocando assim uma baixa produtividade na área (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008).

Como a atividade agrícola consiste em percorrer, utilizando os equipamentos e implementos um talhão em diversos pontos denominados faixas que vão de uma extremidade a outra do talhão, pode-se estabelecer as áreas de manobra onde são realizadas as trocas de faixa, chamadas de cabeceiras (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008)

Outro fator que se relaciona com as manobras realizadas nas cabeceiras é o aumento do consumo de combustível, pois quando é realizada a manobra de retorno, é percorrida uma distância e cabe ao operador da máquina definir qual a próxima faixa a ser tratada. Descobrir qual a próxima faixa seguir, é

comparativamente simples em algumas operações como, por exemplo, na colheita, ou quando há vestígios na superfície do campo (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008).

A distância percorrida durante a manobra de retorno é chamada de distância de não trabalho, que pode ser definida como a distância entre duas vias de trabalho e dependendo da manobra realizada há um aumento no consumo de combustível uma vez que podem ser realizadas manobras mais longas o que pode aumentar em cerca de 36% a quantidade de combustível utilizado (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008, HAMEED, 2013).

Nos grandes sistemas agrícolas, há uma grande quantidade de capital investido em máquinas buscando atingir a máxima eficácia da produção. No entanto para que as tarefas sejam realizadas de forma eficaz por uma ou mais máquinas, é necessário que haja um planejamento (BOCHTIS; VOUGIOUKAS; TSATSARELIS, 2006).

O planejamento de rotas a serem percorridas durante a realização de uma determinada tarefa é fundamental para que a operação seja realizada de maneira eficiente, uma vez que a distância percorrida afeta diretamente fatores importantes, como consumo de combustível e compactação do solo, proveniente do peso do maquinário agrícola (CONESA-MUÑOZ; PAJARES; RIBEIRO, 2016).

Uma das estratégias que está sendo implementada buscando minimizar a compactação e o consumo de combustível causado pelo tráfego é o controle de tráfego agrícola, uma vez que com ele os campos possuem uma área de tráfego aproximadamente de 10 a 20% da área do campo, enquanto com a utilização do tráfego de forma descontrolada, é utilizada uma área de 80 a 100%, durante o preparo intensivo e de 30 a 60% durante outras atividades (GASSO et al., 2013).

Para se realizar o controle de tráfego agrícola é necessário se realizar o planejamento de rotas em campos agrícolas. Esse planejamento pode ser expresso na forma de uma extensão do Problema de Roteamento de Veículos Capacitivo - CVRP (CONESA-MUÑOZ et al., 2016), que se baseia no problema clássico do caixeiro-viajante. Assim, o Planejamento de Rotas em Campos Agrícolas pode ser definido como um problema NP-Difícil devido à grande complexidade e quantidade de soluções possíveis.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método que realize o planejamento de Rotas em campos agrícolas, buscando minimizar a compactação do solo nas cabeceiras, a distância percorrida e os gastos de combustível.

Devido a esta complexidade, para a resolução deste problema foi utilizado a metaheurística “Algoritmo de Otimização por Nuvem de Partículas (PSO)” e Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO), denominadas do tipo comportamental.

A otimização realizada pelo algoritmo PSO trata da minimização da distância percorrida, o que consequentemente impacta na compactação do solo nas cabeceiras e nos gastos de combustível.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução.

No Capítulo 2 - , é abordado de modo geral alguns termos pertinentes ao trabalho como, por exemplo, o problema de roteamento de veículos na agricultura e as metaheurísticas.

No Capítulo 3 - são apresentados alguns trabalhos relacionados, apontando os principais tópicos apresentados nesses trabalhos e sua conclusão com relação ao tema proposto.

O Capítulo 4 - apresenta a implementação realizada neste trabalho detalhando o método, evidenciando os objetivos de forma mais detalhada, clara e concisa. Também apresenta as ferramentas utilizadas e a forma que a validação do método desenvolvido foi realizada.

Após no Capítulo 5 - é mostrado os resultados encontrados durante a validação e também nos campos exemplo utilizados.

Por fim é apresentada a conclusão desse trabalho no Capítulo 6 - , juntamente com alguns trabalhos futuros frutos desse método.

# Capítulo 2

## CONCEITOS

---

Com a crescente demanda por alimentos, o índice de terras cultiváveis vem diminuindo, sendo estimada uma área per capita de 0,20ha em 2050, contrastando com 0,45ha em 1960. Além desta estimativa o Programa para o Meio Ambiente das Nações unidas estimou que fosse necessário aumentar em cerca de 70% a produção de alimentos. Para suprir esta demanda os produtores rurais necessitam obter uma maior produtividade em sua lavoura (ONU/PNUMA, 2014).

No entanto diversos fatores tornam-se prejudiciais causando a diminuição na produtividade. Esses fatores podem ser causados de forma natural ou antrópica, sendo que entre as causas naturais mais relevantes são a gênese do solo e de processos químicos, biológicos e mecânicos, ocorrendo principalmente em regiões tropicais e subtropicais haja vista que devido às condições das altas temperaturas e maior precipitação pluvial acelera a remoção dos nutrientes (LOPES e GUILHERME, 2007).

Já os fatores antrópicos são causados pelo manejo inadequado do solo, podendo levar a solos férteis se tornarem inférteis, sendo uma das maiores causas de degradação do solo a erosão, que em muitos casos são permanentes. A principal diferença entre a erosão e a queda de fertilidade causada por causas naturais é que a erosão não pode ser reparada de forma rápida e em muitos casos causa um dano irreparável na produtividade do campo (LOPES e GUILHERME, 2007)

Uma das causas da erosão é a compactação do solo, apresentado por Filizola (2012) como sendo um dos problemas mais graves que o solo pode apresentar. Girardello (2014) também apresenta a compactação do solo como um dos principais fatores a diminuição da produtividade. Em um solo compactado há uma dificuldade

na penetração das raízes o que impede que as plantas se desenvolvam e as raízes se aprofundem buscando nutrientes e água.

A compactação do solo ocorre quando as partículas do solo são pressionadas e o espaço entre os poros são reduzidos. Com a diminuição desses poros ocorre uma diminuição na infiltração da água e drenagem uma vez que com os poros grandes a movimentação de água para as camadas inferiores é realizada de forma facilitada. Outro problema que ocorre é uma limitação na quantidade de solo explorada pelas raízes e com isso pode ocorrer uma diminuição na absorção de água e de nutrientes. Além disso, também diminui a troca dos gases ocasionando um aumento na probabilidade de se ocorrer problemas relacionados à aeração (DEJONG-HUGHES et al, 2001).

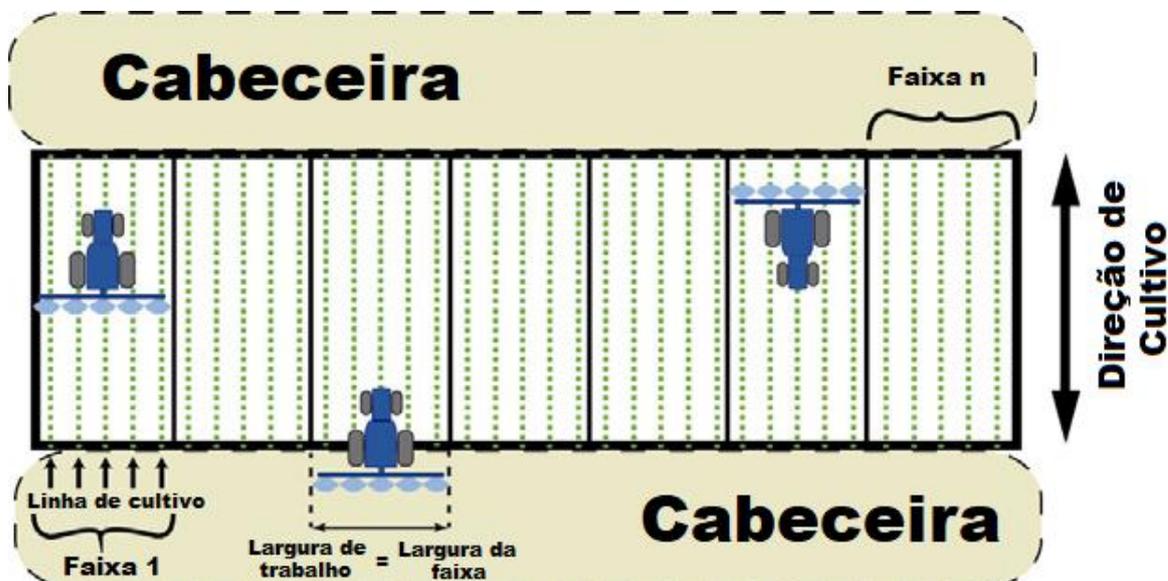
A compactação do solo ocorre de diversas formas. DeJong-Hughes et al (2001) apontam o tráfego realizado no campo durante as atividades agrícolas como um dos principais fatores causadores da compactação severa do solo, uma vez que houve um aumento do peso do maquinário de aproximadamente 3 toneladas na década de 1940 para aproximadamente 20 toneladas.

Além dos problemas que causam a diminuição da produtividade os custos de produção são os principais fatores que afetam a rentabilidade no campo agrícola e segundo a CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, eles são divididos em dois tipos: fixos e variáveis. Os custos fixos independem da produção, ou seja, são os custos relacionados à depreciação de equipamentos, seguros e impostos, mão-de-obra e em muitos casos, no qual o campo é arrendado, a remuneração da terra, sendo chamados também de custos indiretos. Os custos variáveis são os custos que dependem da produção e com isso mudam de acordo com o volume de produção sendo chamados também de custos diretos e se relacionam com as despesas relacionadas ao combustível utilizado nos maquinários, insumos utilizados na aplicação de defensivos agrícolas, fertilizantes, dentre outros (CONAB, 2010).

Os custos diretos estão associados à realização das atividades agrícolas, uma vez que pode ocorrer sobreposição de áreas durante a aplicação de defensivos agrícolas, ou até mesmo durante o processo de planta. Para a realização das atividades agrícolas, o campo é dividido em faixas. Essas faixas são delimitadas a partir da largura do implemento utilizado. A representação da divisão das faixas é apresentada na Figura 3. A definição de qual faixa seguir é essencial durante o processo, pois está diretamente associada a diversos fatores, como por exemplo, o

consumo de insumos, a distância total percorrida, e conseqüentemente a compactação do solo associada (CONESA-MUÑOZ; PAJARES; RIBEIRO, 2016).

**Figura 3: Adaptação da representação da divisão do campo durante a realização de uma atividade agrícola**



Fonte: CONESA-MUÑOZ; PAJARES; RIBEIRO, 2016

A tarefa de se identificar a sequência de faixas que cubra todo o campo, sendo que em alguns casos há necessidade de se realizar o retorno ao depósito para que seja realizado o reabastecimento, se assemelha ao objetivo realizado pelo Problema de roteamento de veículos que é um clássico na área de computação e é classificado como um problema NP-Difícil. Ele pode ser expresso como uma extensão do Problema de Roteamento de Veículos Capacitivo (CVRP), pois em ambos os problemas os veículos podem ter características diferentes e as faixas que compõem o campo podem ser entendidas como os clientes a serem visitados (CONESA-MUÑOZ; PAJARES; RIBEIRO, 2016; CONESA-MUÑOZ et al., 2016).

Desse modo, é pertinente que esse tema seja abordado utilizando métodos probabilísticos e por ser um problema de otimização combinatória é apropriado a utilização de metaheurísticas em sua resolução (CONESA-MUÑOZ et al., 2016).

Um enxame pode ser definido como um grupo de agentes que se comunicam entre si de forma que resulte em estratégias para a resolução de problemas. A inteligência em enxame se refere ao comportamento que surge quando estes agentes interagem entre si (ENGELBRECHET, 2007).

Diversos estudos sobre animais, resultaram em diversos modelos computacionais, como por exemplo, formigas, cupins, abelhas, cardume de peixes e

bando de aves, sendo que estes modelos possuem estrutura simples (ENGELBRECHET, 2007).

Os objetivos dos modelos de inteligência baseados em enxames, é modelar os comportamentos dos indivíduos e as interações que eles realizam com o ambiente, podendo ser utilizados para a resolução de problemas complexos, principalmente de problemas de otimização. Essa interação pode ser exemplificada como o feromônio utilizado pelas formigas para encontrar o caminho. Outro exemplo é na otimização por enxame de partículas que utilizam a experiência do vizinho mais próximo que possui uma solução melhor (ENGELBRECHET, 2007)

## 2.1 Problema do Roteamento de Veículos

O problema de roteamento de veículos e suas diversas variantes alcançaram nos últimos 40 anos grande atenção dos pesquisadores. Acredita-se que Dantzig & Ramser (1959), foram os primeiros autores a abordarem o problema de roteamento de veículos, tratando-o sobre o problema de transporte de combustível entre o terminal de fornecimento de combustível e os postos abastecidos pelo terminal. Já o primeiro trabalho que utilizou explicitamente o nome de roteamento de veículos, ao que tudo indica foi de Golden, Magnanti e Nguyen em 1972 (GOLDEN; MAGNANTI; NGUYEN, 1972 apud GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015).

Ele é um problema discreto de otimização que pode ser definido como um problema de se determinar meios que reduzam os custos de armazenagem de produtos em depósitos distantes geograficamente, transportando-os por diferentes vias e utilizando diversos veículos para responder a um pedido heterogêneo e também espalhados geograficamente, sendo que sua complexidade se deve ao grande número de variáveis, não suportando um algoritmo exato e como consequência, os algoritmos empregam uma combinação de técnicas estocásticas e heurísticas para calcular soluções ótimas ou quase ótimas (BOCHTIS; VOUGIOUKAS; TSATSARELIS, 2006; TOTH; VIGO, 1987). Possui como objetivo encontrar as rotas dos veículos que possuem custos mínimos tais que: cada cliente seja visitado uma única vez, a demanda não deve exceder a capacidade do veículo e todo caminho realizado por um veículo deve iniciar e finalizar no mesmo depósito.

Além disso, o custo é expresso com diversos objetivos como minimizar o tempo de viagem e a quantidade de veículos empregados na realização da tarefa (ENGELBRECHET, 2005)

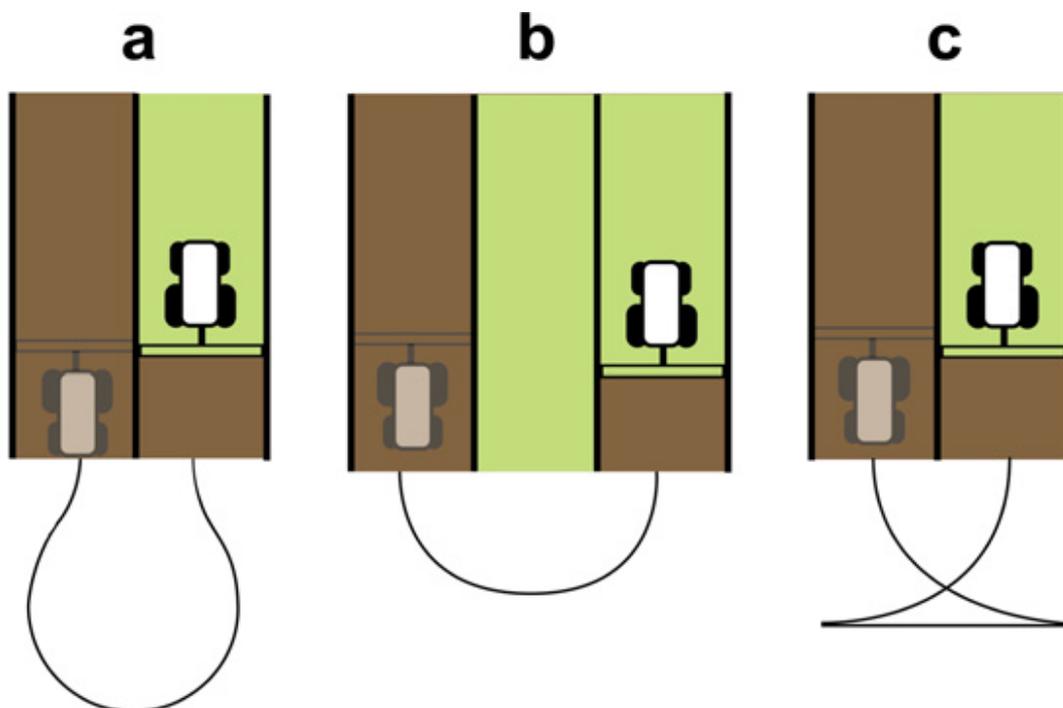
Resumidamente, a solução do problema consiste em determinar um conjunto de rota realizada por um veículo que sai e retorna para o mesmo depósito, atendendo a todos os requisitos dos clientes, minimizando o custo de transporte e cumprindo todas as restrições. Geralmente é descrito como um grafo em que os vértices representam os clientes e os locais de depósitos, e as arestas equivalem ao caminho entre os vértices, sendo que cada aresta contém um custo, que geralmente constitui da distância e tempo de viagem. Além disso, elas podem ser dirigidas ou não dirigidas, caso o caminho possa ser percorrido em apenas uma direção (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

As soluções do problema de roteamento de veículos são utilizadas para solucionar não apenas problemas relativos a entrega ou retirada de encomendas, mas também se utiliza para a solução de diversos problemas que utilizam sistemas de transporte, como por exemplo: coleta de resíduos sólidos, limpeza de ruas, roteamento de ônibus escolar, etc (TOTH; VIGO, 1987)

## 2.2 Manobras de cabeceiras

As manobras de cabeceiras são operações imprescindíveis durante a realização das atividades agrícolas. Segundo Bochtis e Vougioukas (2008), as manobras de cabeceira mais comuns são o dobro de canto redondo, ou volta  $\pi$ , loop ou volta à frente, conhecida como volta  $\Omega$  e inverso ou volta T. As manobras são apresentadas na Figura 4, onde (a) representa a volta  $\Omega$ , (b) representa a volta  $\pi$  e (c) representa a volta T.

Figura 4: Tipo de manobras de cabeceira mais comuns utilizadas nos campos agrícolas



Fonte: Bochtis e Vougioukas (2008)

A distância percorrida durante a manobra de cabeceira deve ser somada à largura da pista, para isso Bochtis, Vougioukas, Tsatsarelis (2006) formulou duas equações: uma para o cálculo da distância durante a realização da volta  $\pi$  e outra para a realização da volta  $\Omega$ . Essas fórmulas foram calculadas a partir da distância euclidiana e formuladas utilizando a cinemática da máquina. Em Bochtis e Vougioukas (2008) é apresentado de forma mais clara as equações referentes ao cálculo da distância percorrida durante a realização da volta  $\Omega$  e da volta  $\pi$ , que são apresentadas em (1) e (2) respectivamente.

$$\Omega(d) = r_{\min} * \left( 3\pi - 4 \sin^{-1} \left( \frac{2r_{\min} + d.w}{4r_{\min}} \right) \right) \quad (1)$$

$$\Pi(d) = d * w + (\pi - 2)r_{\min} \quad (2)$$

Onde:  $d$  é a distância entre as duas faixas,  $r_{\min}$  é o raio de rotação da máquina e  $w$  é a largura de operação da máquina (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008).

## 2.3 Heurística

Com a escassez de respostas dos métodos exatos os esforços foram concentrados para o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que buscam uma solução aproximada e eficiente para os problemas NP-Difícil. Esses métodos foram propostos há vários anos, sendo denominados heurísticos (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

Pearl (1984) definiu heurística como sendo técnicas, critérios ou princípios para se definir qual a direção a ser seguida que seja capaz de chegar a determinado objetivo, representando uma combinação de duas condições: a necessidade de simplificar os critérios, e de forma simultânea, a capacidade de se discernir dentre alternativas boas e ruins.

A palavra Heurística deriva-se do grego “*Heuristikein*”, e significa descobrir ou achar, no entanto quando se refere a programação matemática, sua definição avança além de sua origem, permitindo interpretação como a de Kendra Van Wagner-Cherry (2014 apud GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015):

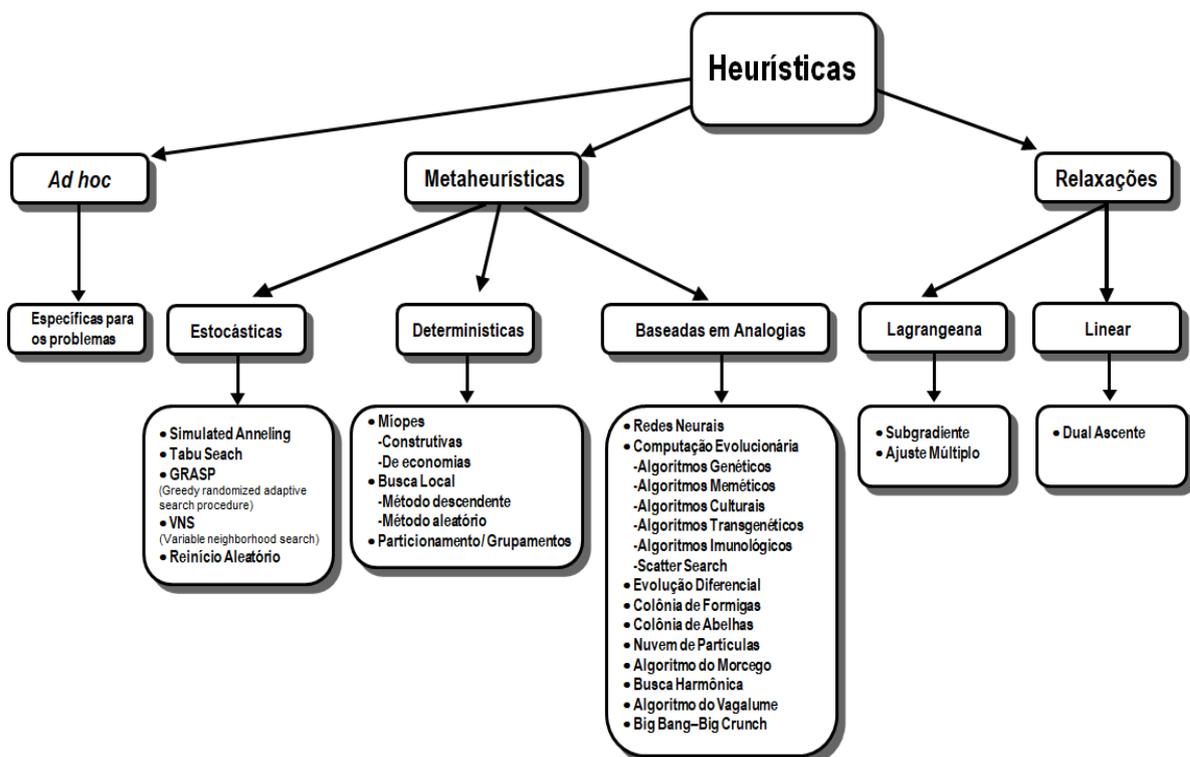
*“Uma heurística é um atalho mental que permite às pessoas resolver problemas e fazer julgamentos de forma rápida e eficiente”*

Uma heurística é um método computacional aproximado que busca uma solução considerada aceitável para um dado problema que pode ser representado computacionalmente para a resolução de problemas NP-Difíceis, sendo esperado em muitos casos, que elas alcancem valores ótimos, especialmente quando elas começam próximas de um valor ótimo (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015). Esses problemas requerem uma análise de uma grande quantidade de possibilidades a fim de se encontrar uma solução precisa. No entanto, como em muitos casos dura mais que uma vida encontrar essa solução, as heurísticas buscam um modo de se encontrar as soluções em tempo aceitável (PEARL, 1984). Procura-se ainda que a solução encontrada seja capaz de ser aperfeiçoada a partir de certas condições, tal que sejam respeitadas as garantias qualitativas adicionais. Porém por se tratar de um método de busca no qual não há garantias do sucesso,

ela deve ter o comprometimento de retribuir sendo eficaz computacionalmente (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

As primeiras heurísticas foram desenvolvidas para solucionar problemas particulares, não sendo extensíveis a outros problemas. Um bom exemplo de heurísticas *ad hoc* de alta eficiência são as clássicas heurísticas de roteamento. Diversas heurísticas desenvolvidas para a solução de problemas combinatórios NP-Difíceis, utilizavam estratégia de enumeração parcial ou incompleta, aplicavam regras que permitiam soluções aproximadas e relaxações (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015). A classificação das abordagens heurísticas é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Classificação das abordagens Heurísticas



Fonte: GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015

## 2.4 Metaheurística

Recentemente surgiu uma nova classe de técnicas orientadas a conduzir o processo de construção de heurísticas, sendo visto como um método heurístico

geral projetado para guiar a heurística específica durante a solução de um problema. Esses métodos foram chamados de heurísticas modernas, ou como é mais conhecido metaheurísticas. O nome surge da combinação do prefixo meta (que significa nível superior) com o termo heurística (que significa encontrar). Uma metaheurística é uma combinação de métodos heurísticos que tem como objetivo promover com eficácia a exploração do espaço de busca, superando assim a armadilha da busca local em um espaço complexo. Também pode ser entendido como um método heurístico geral que é desenvolvido para guiar uma heurística específica, ou seja, uma estratégia maior de desenvolvimento de métodos menores ou heurísticas (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

As metaheurísticas são empregadas em problemas que se tem pouca informação para auxiliar no processo de resolução em que a utilização do método de força bruta não é viável, e há poucos dados heurísticos para prosseguir. No entanto, caso uma provável solução seja encontrada, ela pode ser analisada para verificar sua viabilidade (LUKE, 2013).

Uma metaheurística é inspirada em diversos temas, dentre eles pode-se destacar as analogias com fenômenos físicos, químicos, biológicos, semânticos, sociais, etc. Elas podem ser classificadas de acordo com a estrutura de vizinhança empregada ou pela estratégia de obtenção da solução (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

Nas metaheurísticas que utilizam a estrutura de vizinhança, ela ainda pode ser subdividida em fixa, flexível e variável. Quando a vizinhança é fixa, onde essa vizinhança é definida no início e permanece constante durante a busca, sendo exemplos o Reinício Aleatório, o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e o *Simulated Annealing*. Quando é utilizada a estrutura de vizinhança flexível, a busca não está associada em uma determinada vizinhança específica, podendo ser alterada de forma aleatória ou sistematicamente. Dentre as metaheurísticas temos a *Scatter Search*, busca tabu e os algoritmos evolucionários. Já a vizinhança variável explora a viabilidade de se testar sistematicamente diversas estruturas de vizinhança, sendo o algoritmo de Busca em Vizinhança variável um exemplo de metaheurística nessa categoria (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

Nas metaheurísticas que são executadas em função da estratégia de solução, há uma subdivisão em Construtivas, Evolutivas, de Decomposição e de informação

compartilhada. Nas metaheurísticas construtivas as soluções são projetadas de forma crescente e passo a passo, podendo ser aperfeiçoadas. Nessas metaheurísticas se enquadram o GRASP e Colônia de Formigas. Já as metaheurísticas evolutivas, as soluções são construídas a partir de soluções previamente conhecidas, tendo critérios que permitem escolher um grupo de soluções consideradas boas, para refazer a busca, sendo exemplo os Algoritmos genéticos, Meméticos, Culturais, Simbióticos, Transgênicos, dentre outros. Nos algoritmos de decomposição, as soluções são encontradas a partir de subproblemas, sendo de especial adaptação a paralelização. Dentre essas tem-se a decomposição heurística de Dantzig-Wolfe (apud GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015), decomposição heurística de Benders (apud GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)), etc. E finalmente a de informação compartilhada, onde as soluções são organizadas a partir de um grupo de métodos que constroem ou modificam elas ao longo da execução. Nesse tipo de metaheurística, as informações podem se basear fazendo uma analogia com o meio ambiente, como por exemplo, o Algoritmo de colônia de formigas; outra analogia que é feita é com a dinâmica de um bando de pássaros, sendo exemplo o algoritmo de nuvem de partículas; ou ainda quando é realizada com a dinâmica da troca genética do fluxo intra e extracelular, como os algoritmos transgênicos (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2015)

### **2.4.1 Enxame de partículas (PSO)**

A otimização por enxame de Partículas é um algoritmo que se baseia no comportamento social das aves, e sua intenção inicial é simular a coreografia realizada imprevisivelmente e de forma elegante (ENGELBRECHET,2007). Ela foi desenvolvida em 1995 pelo psicólogo social James Kennedy e pelo engenheiro eletricitista Russel Ebehart, inspirados nas teorias de inteligência coletiva (LOPES; RODRIGUES; STEINER, 2013).

Nele as partículas ou indivíduos “voam” pelo espaço de busca alterando a posição entre si, utilizando a experiência da própria partícula e das vizinhas, que formam o enxame (ENGELBRECHET,2005; LOPES; RODRIGUES; STEINER, 2013).

Com isso, se uma partícula encontrar um bom caminho para o alimento, o restante do enxame será capaz de se dirigir ao mesmo caminho rapidamente, embora esteja posicionado afastado do enxame (RAO, 2009).

Na execução do algoritmo, as partículas se localizam em locais aleatórios inicialmente e cada uma possui duas características, a posição e a velocidade.

Considerando um bando de aves, os pássaros devem seguir a algumas regras como não chegar muito perto dos outros pássaros, seguir a direção média dos outros pássaros e realizar um ajuste de forma a não deixar muito espaço entre elas. Assim, o comportamento é baseado em 3 três fatores, a coesão, a separação e o alinhamento.

Baseando-se nesses fatores o PSO é modelado da seguinte forma: Ao encontrar o alvo, a ave transmite as informações a todas as outras; não vão diretamente ao alvo; e os pássaros têm pensamento próprio e a memória anterior (RAO, 2009). A ideia do pseudocódigo é apresentada na Figura 6.

**Figura 6: Adaptação do Pseudocódigo do PSO**

1	Inicializar a população
2	<b>Repita</b>
3	Calcule o <i>fitness</i> das partículas
4	Modificar as melhores partículas no enxame
5	Escolher a melhor partícula
6	Calcular as velocidades das partículas
7	Atualizar as partículas
8	<b>Até</b> os critérios serem satisfeitos

**Fonte: Karaboga e Akay (2009)**

A movimentação das partículas é realizada utilizando a experiência da partícula e da melhor partícula. Este passo é realizado utilizando a equação expressa em (3) onde  $t$  representa a iteração atual e conseqüentemente  $(t + 1)$  a próxima execução,  $v_i$  a velocidade da partícula  $x_i$ ,  $R_1$  e  $R_2$  são valores aleatórios no intervalo  $[0,1]$   $c_1$  e  $c_2$  são constantes de aceleração,  $P_i$  é o melhor valor da partícula  $x_i$  e  $P_b$  o melhor valor entre todas as partículas (NICKABADI; EBADZADEH; SAFABAKHSH, 2011). A atualização da partícula com a nova velocidade é dada pela equação expressa em (4).

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + R_1 c_1 (P_i - x_i(t)) + R_2 c_2 (P_b - x_i(t)) \quad (3)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (4)$$

No PSO, há diversos parâmetros básicos que devem ser verificados, como o tamanho das partículas, ou seja, a quantidade de partículas na nuvem. Quanto mais partícula maior a diversidade inicial do enxame, porém deve ser utilizada uma forma que inicialize a partícula uniformemente no espaço de busca. Outro parâmetro é o tamanho da vizinhança que define a extensão da interação social no enxame, quanto menor a vizinhança menor interação ocorre, ou seja, há uma convergência mais lenta. A quantidade de interações também é um parâmetro importante para que seja alcançada a melhor solução, porém é dependente do problema: poucas interações terminam as buscas prematuramente, já muitas interações têm como consequência uma complexidade computacional desnecessária. Porém um dos principais parâmetros que controlam a influência dos componentes sociais e cognitivos na velocidade geral são os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$ , juntamente com os vetores randômicos  $R_1$  e  $R_2$  (ENGELBRECHET,2005).

Os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  são os parâmetros de confiança, geralmente estáticos, onde  $c_1$  expressa a confiança que a partícula tem em si e o  $c_2$  expressa a confiança que a partícula tem em seus vizinhos. Quando  $c_1$  e  $c_2$  são iguais a 0, as partículas voam na mesma velocidade. Já se o  $c_1 > 0$  e  $c_2 = 0$ , as partículas são independentes. Caso  $c_2 > 0$  e  $c_1 = 0$ , todo o enxame é atraído para um determinado ponto. A força das partículas é extraída quando há um equilíbrio entre  $c_1$  e  $c_2$  ou seja,  $c_1 \neq c_2$ . Já se  $c_1 > c_2$  as partículas são atraídas mais para a posição atual do que a global, e o caso contrário acontece quando  $c_2 > c_1$  (ENGELBRECHET,2005).

### 2.4.2 Colônia de Formigas (ACO)

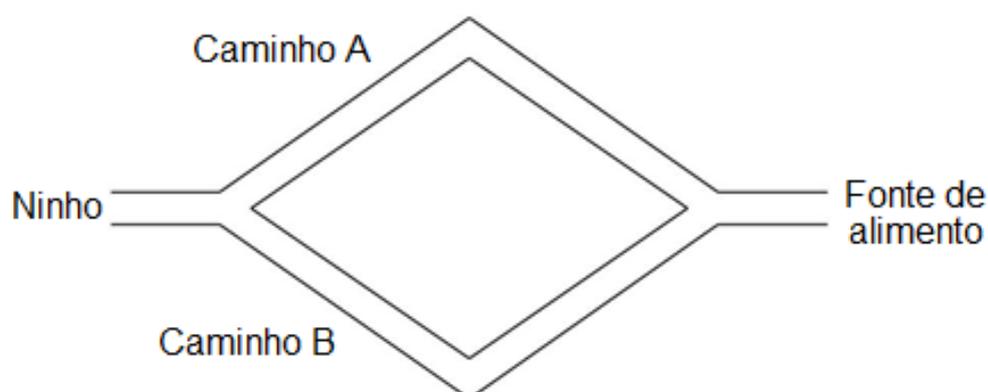
Surgindo a aproximadamente 100 milhões de anos atrás, as formigas hoje têm uma população estimada em torno de  $10^{16}$  indivíduos e o peso total na mesma grandeza dos seres humanos. Em sua maioria são insetos que vivem em colônias e o comportamento social desses insetos são complexos e intrigam os seres humanos (ENGELBRECHET,2005).

Durante os anos 40 e 50, o entomologista francês Pierre Paul Grassé notou que algumas espécies de cupins reagem a estímulos que são produzidos pela passagem de outros cupins pelo mesmo local (DORIGO; BIRATTARI; STUTZLE, 2006). Grassé definiu como *stigmergy* a forma de comunicação entre os insetos na construção dos ninhos das espécies de Térmitas *Bellicositermes natalensis* e *Cubitermes*, e que essa atividade não é realizada individualmente. *Stigmergy* deriva-se de duas palavras gregas: *stigma* que significa sinal, e *ergon* que significa trabalho. Ou seja, os indivíduos observam sinais e isso provocam ações que podem reforçar ou modificar para que influenciem os outros indivíduos (ENGELBRECHET,2005).

A *stigmergy* também foi observada em colônias de formigas, sendo que em muitas espécies, durante a busca de alimentos, elas depositam uma substância chamada feromônio. As outras formigas percebem a presença deste feromônio e tendem a seguir os caminhos por onde a presença de feromônios é maior, ou seja, foi percorrida por um número maior de formigas (DORIGO; BIRATTARI; STUTZLE, 2006). Na modelagem algorítmica, esse comportamento baseia-se no conceito de *stigmergy* artificial que Dorigo e Di Caro definem como “comunicação indireta mediada por modificação numérica de estados ambientais que são acessíveis apenas localmente pelos agentes comunicantes” (ENGELBRECHET,2005).

A pesquisa a respeito do depósito de feromônio foi realizada em um experimento chamado de “experimento da ponte dupla”, em que um ninho de formigas foi unido a uma fonte de alimento utilizando duas pontes com distâncias iguais, visto na Figura 7.

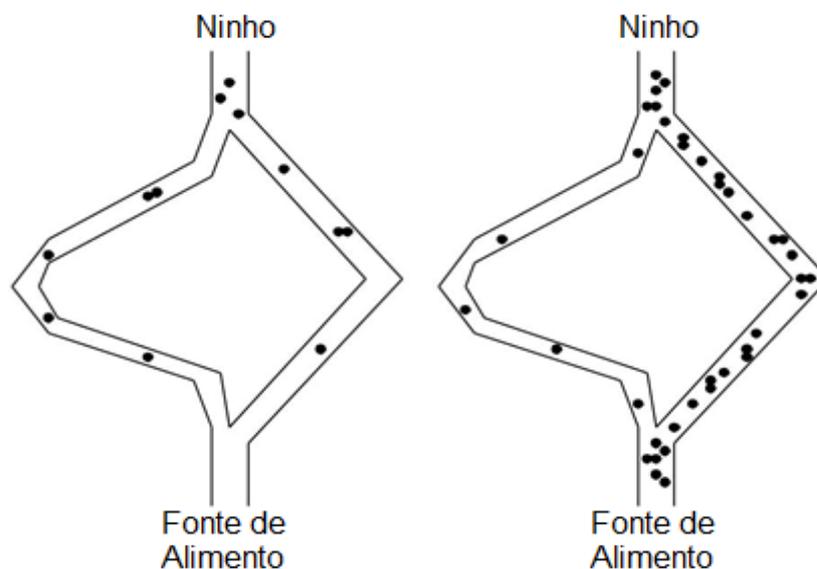
Figura 7: Adaptação do experimento da ponte dupla realizado por Deneubourg et al



Fonte: Engelbrecht,2007

Inicialmente as formigas escolheram de forma aleatória o caminho, porém com as oscilações aleatórias após um tempo uma das pontes possui mais feromônio que a outra, fazendo com que seja escolhida por uma maior quantidade de formigas. Após um tempo, a colônia toda utiliza a mesma ponte (DENEUBOURG et al, 1990 apud DORIGO; BIRATTARI; STUTZLE, 2006). De forma semelhante, Goss et al (1989 apud DORIGO; BIRATTARI; STUTZLE, 2006) desenvolveram uma variante do experimento da ponte dupla em que uma das pontes é maior que a outra. O experimento desenvolvido por Goss et al (1989) pode ser observado na Figura 8, e assim como o experimento da ponte dupla, as formigas inicialmente escolhem ao acaso a ponte a ser utilizada, no entanto, as formigas que escolheram a ponte com uma distância menor, chegam primeiro ao ninho e com isso recebem mais feromônio, aumentando assim a probabilidade de as outras formigas selecionarem o mesmo caminho(GOSS et al, 1989).

**Figura 8: Adaptação do experimento realizado por Goss et al (1989)**



**Fonte: (Engelbrecht,2007)**

Observando esse comportamento, Goss et al (1989 apud DORIGO; BIRATTARI; STUTZLE, 2006) desenvolveram um modelo expresso em (5), onde  $m_1$  as formigas que utilizaram a primeira ponte,  $m_2$  a segunda, a probabilidade da ponte  $p_1$  e os parâmetros  $k$  e  $h$  valores a serem ajustados aos dados do experimento, que a partir de simulações de Monte Carlo, apontou para um valor aproximado de 20 para  $k$  e de aproximadamente 2 para  $h$ .

$$p_1 = \frac{(m_1+k)^h}{(m_1+k)^h + (m_2+k)^h} \quad (5)$$

Tendo como inspiração o modelo proposto por Goss et al (1989 apud Dorigo, Birattari e Stutzle (2006)), foi desenvolvido a otimização de colônia de formigas, onde as denominadas formigas artificiais criam soluções para determinado problema de otimização e trocam as informações sobre essas soluções de forma similar ao realizado pelas formigas reais. Foram apresentados diversos algoritmos de otimização por colônia de formigas, o original foi proposto no início dos anos 90 e nomeado como *ant system*.

Em seu artigo, Dorigo e Gambardella (1997) apresenta a estrutura do algoritmo de otimização por colônia de formigas (ACO), utilizando na solução do problema do caixeiro viajante, onde cada formiga deve se mover de uma cidade para outra dentro do grafo.

No processo de execução do ACO, inicialmente cada formiga é colocada em uma cidade de forma aleatória. Após, é escolhida de forma probabilística a próxima cidade a ser visitada. Para isso, elas preferem as cidades conectadas pelas arestas que possuem uma distância menor e um caminho com feromônios. Essa escolha é realizada utilizando a equação expressa em (6), em que  $\alpha$  representa o grau de importância do feromônio,  $\tau_{ij}$  representa o feromônio do caminho entre os nós  $i$  e  $j$ ,  $N_i^{(k)}$  indica os nós vizinhos da formiga  $k$  (RAO, 2009). Quando todas finalizarem o passeio, é realizado o processo de evaporação realizado a partir da equação expressa em (7), onde  $p$  corresponde à taxa de evaporação, sendo um valor entre  $(0,1]$ . Após a ser realizado o processo de evaporação, é realizada a atualização do feromônio nas arestas visitadas pelas formigas, sendo utilizada a equação expressa em (8), onde  $\Delta\tau^{(k)}$  pode ser calculado de duas formas: utilizando a equação expressa em (9) ou em (10). Sendo que a equação expressa em (9) é calculada utilizando uma constante  $Q$  e  $L_k$  representa a distância do início do caminho até o nó  $k$ . A equação expressa em (10) utiliza  $f_{best}$ , o valor do melhor caminho,  $f_{worst}$  o pior caminho, sendo utilizado também  $\zeta$ , um parâmetro de controle da atualização do feromônio, sendo quanto maior o valor de  $\zeta$  mais feromônios são depositados no melhor caminho ( DORIGO; GAMBARDELLA, 1997, RAO, 2009).

$$p_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha}{\sum_{j \in N_i^{(k)}} \tau_{ij}^\alpha} & \text{se } j \in N_i^{(k)} \\ 0 & \text{se } j \notin N_i^{(k)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = (1 - p) \cdot \tau_{ij} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau^{(k)} \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{(k)} = \frac{Q}{L_k} \quad (9)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{(k)} = \frac{\zeta f_{best}}{f_{worst}} \quad (10)$$

## 2.5 Considerações Finais

Com o crescente aumento da população, prevendo-se um total de 9,6 bilhões de habitantes em 2050, visto o aumento da expectativa de vida, há uma necessidade de se aumentar a produção de alimentos. Essa necessidade vem a cada ano esgotando os recursos da natureza, visto que em relatório do WWF, mostrou-se que em 2013 a humanidade consumiu em oito meses o que a natureza consegue regenerar em um ano (Spers, Haberli; 2018). Com isso torna-se indispensável a melhoria da produtividade nos campos agrícolas já cultiváveis.

A produtividade de um campo é afetada por diversos fatores sejam naturais ou antrópicos. Os fatores antrópicos são aqueles causados pelo ser humano como a degradação do solo e até mesmo a erosão.

Uma das causas da erosão é a compactação do solo, apresentado como um dos problemas mais graves do solo. Ela desfavorece a penetração das raízes no solo e ocorre quando as partículas do solo são pressionadas e o espaço entre os poros diminuem. A compactação do solo ocorre de diversas formas sendo o tráfego realizado durante a realização de uma atividade agrícola um dos principais fatores causadores da compactação severa do solo.

Além disso, outros fatores também desfavorecem a produtividade como, por exemplo, os custos de produção, que em alguns casos podem ser diminuídos.

Dentre os custos que podem ser minimizados está o consumo de combustível e insumos como sementes e defensivos agrícolas, que podem ser diminuídos quando se há sobreposição de trilhas.

Levando em conta estes fatores, uma das maneiras de se aumentar a eficiência do campo é realizando o tráfego controlado que busca diminuir diversos fatores como a compactação do solo, utilização de combustíveis e até mesmo a quantidade de insumos utilizados, realizando a diminuição na distância percorrida durante as manobras de cabeceiras.

O problema relacionado à realização do tráfego controlado se relaciona com o problema de roteamento de veículos que busca diminuir dentre outros fatores a distância percorridos na realização de uma determinada atividade ou até mesmo dois ou mais objetivos em conjunto.

Assim como o problema de roteamento de veículos, o problema de se realizar o planejamento de rotas em campos agrícolas é um problema NP-Difícil de otimização combinatória, sendo a metaheurística um dos métodos apropriados à resolução.

Da mesma forma que o problema de roteamento de veículos, no planejamento de rotas em campos agrícolas, diversos objetivos podem ser otimizados de forma simultânea.

# Capítulo 3

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

As pesquisas relacionadas a planejamento de rotas em campos agrícolas, não é um assunto novo. Elas já foram realizadas em diversas partes do mundo e de diversas formas. Bochtis e Vougioukas (2008), por exemplo, realizaram suas pesquisas na Grécia e se tornaram muito importantes nesse campo. Já Conesa-muñoz realizou seus estudos na Espanha e se baseou nos estudos realizados por Bochtis e Vougioukas (2008). Spekken e Bruin (2012) realizaram pesquisas tanto no Brasil quanto na Holanda, terra que realizou um dos primeiros estudos a respeito do tema. Outro país que possui destaque é a Austrália que dentre outros projetos pode-se citar os realizados por Tullberg, Yule e McGarry (2007). Além destes pesquisadores, pode-se citar Hameed (2013), Seyyedhasani e Dvorak (2018).

Os experimentos realizados pelos pesquisadores relacionados a este tema visam diversos objetivos, dentre os quais pode-se citar a otimização da distância de não-trabalho que é a distância percorrida durante a manobra de retorno, a otimização do tempo de trabalho, a otimização na utilização de insumos como combustível, herbicidas dentre outros.

### 3.1 As primeiras pesquisas

Um dos primeiros trabalhos envolvendo o problema de roteamento de veículos em campos agrícolas, foi apontado por Lamers et al (1986) nos polders holandeses, que são porções de terra alagável que são protegidos por diques (Ferreira, 1986), e visou resolver os problemas técnicos relacionados ao tráfego e a

influência da compactação no rendimento das culturas. Ele descreve dois estudos, um realizado pela Estação de pesquisa para a produção agrícola e campo de legumes – PAGV e outro realizado pelo Instituto de Engenharia agrícola – IMAG entre os anos de 1976 e 1984. No estudo realizado pelo PAGV, houve um aumento de cerca de 3% ao utilizar o tráfego controlado, enquanto o estudo realizado pelo IMAG houve uma melhoria de cerca de 7%, quando comparado com o tráfego aleatório. No entanto como o foco do trabalho foi estabelecer as características do solo, ele não cita o método estudado e não recomendou a adoção nos polders holandeses naquela época, devido aos custos de implementação, uma vez que os benefícios são limitados e que foi calculado um rendimento bruto de apenas 2% e um custo de cerca de 30% dos custos anuais, na aquisição de aparelhos de orientação, modificação dos tratores e aquisição e máquinas.

### **3.2 A utilização na Austrália**

Na Austrália, assim como nos polders holandeses, foram realizadas pesquisas que tiveram como objetivo a verificação para adoção nos sistemas agrícolas. No estudo realizado por Tullberg, Yule e McGarry (2007), os experimentos começaram a ser desenvolvidos no final da década de 1980 e nos anos 1990, sendo que em 1994, seis agricultores concordaram em testar em suas terras, e em apenas um ano esses agricultores se convenceram dos benefícios e adotaram o planejamento em suas fazendas inteiras. Esse estudo foi desenvolvido durante 10 anos e foram analisados o perfil e a mudança da estrutura do solo, sendo que por 6 anos foi medido o rendimento e outros fatores, e por 2 anos diversos outros parâmetros foram verificados. Após a adoção, o sistema de tráfego controlado de cada fazenda foi definido de forma exclusiva para cada fazenda e com a ampla adesão pelos agricultores ficou evidente a sua viabilidade.

Outro estudo que Tullberg participou, monitorou a emissão de gases do efeito estufa, visto que a compactação do solo afeta a aeração e a difusividade dos gases dos solos fertilizados. Notou-se que ao utilizar o controle de tráfego houve uma diminuição na emissão do Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) e metano (CH<sub>4</sub>). Esse estudo foi realizado em Queensland, Victória e na Austrália Ocidental durante 3 anos em 6

fazendas produtoras de grãos. A localização dos campos pode ser vista na Figura 9. Como o tráfego controlado há uma diminuição da faixa de tráfego permanente ao se comparar com os campos que não utilizam. Os resultados apontaram que ao se adotar o tráfego controlado a emissão de gases poderia ser reduzida em cerca de 30% a 50% (Tullberg et al, 2018).

**Figura 9: Mapa com a Localização das áreas monitoradas durante o estudo realizado em múltiplas regiões da Austrália**



**Fonte: tullberg et al (2018)**

Já o estudo realizado por Luhaib et al (2017), teve como objetivo avaliar os efeitos da compactação do solo a partir dos requisitos energéticos das operações que envolvem o solo, principalmente o cultivo e a semeadura. Os resultados preliminares indicaram uma melhoria de aproximadamente 35 % no preparo do solo, 37% no processo de semeadura e 54% no processo de arado. Ele foi realizado em uma fazenda, visualizada na Figura 10, que já utilizava o tráfego controlado e o plantio direto por aproximadamente 15 anos, localizada na cidade de Felton, estado de Queensland. Essa área apresenta um solo do tipo Vertisol Preto. Após este estudo, o autor notou a viabilidade da utilização visto que em média, houve uma melhoria de cerca de 40%.

**Figura 10: Local da área experimental utilizada localizado na cidade de Felton no estado de Queensland**



Fonte: Luhaib et al (2017).

### **3.3 A otimização da distância nas cabeceiras**

Bochtis e Vougioukas (2008) formularam o problema de roteamento de veículos como sendo um problema de programação inteira binária. Com o objetivo de analisar os padrões de campo mais comum, e desenvolver um método que minimiza a distância não útil percorrida durante as manobras de cabeceira mais comuns e com isso melhorar a eficiência do campo, foi utilizado o algoritmo de Clark-Wright (CLARKE; WRIGHT, 1964 apud BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008) e foi formulado como sendo uma travessia de um grafo onde a solução consistia em encontrar o caminho mais curto. Para a validação do experimento, os testes foram realizados utilizando uma fazenda experimental, que pode ser observada na Figura 11, localizada na Universidade Aristóteles de Salonica no norte da Grécia.

**Figura 11: Localização da fazenda experimental da Universidade Aristóteles de Salonica localizada no norte da Grécia que foi utilizado três campos que a dimensão do campo "1" é de 50x80m<sup>2</sup>, o campo "2" possui a dimensão de 30x40m<sup>2</sup> e o campo "3" possui dimensão de 30x70m<sup>2</sup>**



**Fonte: Bochtis e Vougioukas (2008)**

Inicialmente foi utilizado um campo considerado pequeno com uma dimensão de aproximadamente 24m X 30m. Para efeito de comparação inicialmente a cobertura do campo foi realizada de forma a se cobrir as faixas de forma contínua e a distância total encontrada durante as voltas foi de 174,14m. Já o segundo foi realizado de forma a se evitar volta  $\Omega$  e foi obtida a distância de 132,35m e no terceiro onde o campo foi dividido em 5 faixas, a distância total foi de 152,84. Quando se utilizou a rota calculada pelo algoritmo, a distância foi de 99,65. Com isso houve uma melhoria de 42,8% em relação ao primeiro teste, 24,7% em relação ao segundo e 34,8% em relação ao terceiro. No segundo experimento, o trator deveria partir do depósito, percorrer os três campos e retornar ao depósito que são mostrados na Figura 11, e a comparação foi realizada entre o trajeto calculado pelo algoritmo e o trajeto definido pelo operador. Como resultado houve uma diminuição de 39,41% na distância de não-trabalho, uma vez que, a distância utilizando a rota calculada foi de 616,88m e calculada pelo operador foi de 1017,81m. Com isso verificou-se que ao utilizar a rota calculada algorítmicamente há uma melhoria, diminuindo os custos de tempo não produtivo, além da compactação do solo nas cabeceiras quando os padrões otimizados utilizarem preferencialmente voltas  $\pi$ . No entanto Bochtis e Vougioukas (2008) apontam que como as trilhas otimizadas não são evidentes para os operadores humanos, há uma tendência para a aplicabilidade em sistemas de direção autônoma.

### 3.4 Os experimentos no Brasil

Com o objetivo de reduzir o tempo não produtivo dos maquinários, Spekken e Bruin (2012) utilizaram como base o experimento realizado por Bochtis e Vougioukas (2008) que utiliza duas formas de se realizar as manobras de conversão nas cabeceiras, definidas como volta  $\pi$  e volta  $\Omega$ . Para isso foi considerada a manobra e fatores como o desvio de obstáculos do campo, carregamento e descarregamento de produtos agrícolas como, por exemplo, sementes, fertilizantes, agroquímicos e colheita, chamado pelo autor de “manutenção”, portanto o objetivo deste trabalho foi contribuir com um método que combina a escolha da melhor orientação de trilhos paralelos com a minimização do tempo necessário para alternar entre as faixas, considerando a perda de tempo devido à manutenção da máquina. Durante os testes, foi verificado diversos ângulos de trabalho, utilizando duas áreas de trabalho.

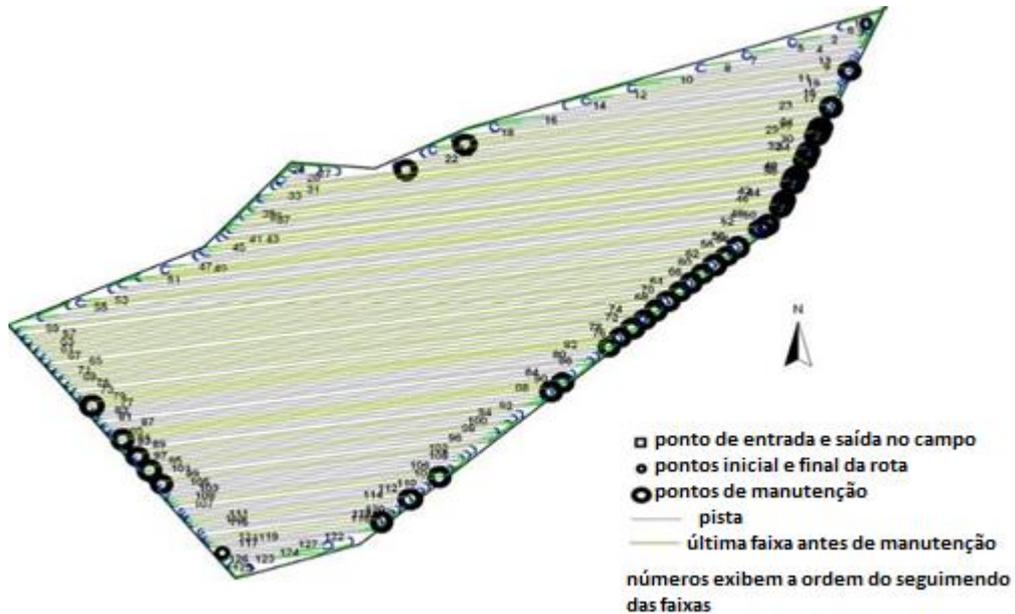
Um dos campos utilizado neste estudo se localiza no Brasil, mais precisamente no estado do Mato Grosso do Sul utilizando o processo de colheita. A Figura 12, mostra o campo que possui uma área de 84,5Ha e a melhor rota encontrada está representada na Figura 13. Nesse teste foi encontrado um tempo não produtivo total de 240,47 minutos, sendo 55,47 minutos gastos durante o processo de rotação da máquina e 185 minutos utilizados no processo de descarregamento em máquinas auxiliares, que realizam esse processo quando a colheitadeira está completamente cheia, sendo realizado um total de 36 paradas.

**Figura 12: Campo utilizado no experimento de colheita localizado no estado de Mato Grosso do Sul**



Fonte: Spekken e Bruin (2012)

**Figura 13: Rota otimizada encontrada para uma operação de colheita sem máquinas auxiliares durante o experimento**



**Fonte: Spekken e Bruin (2012)**

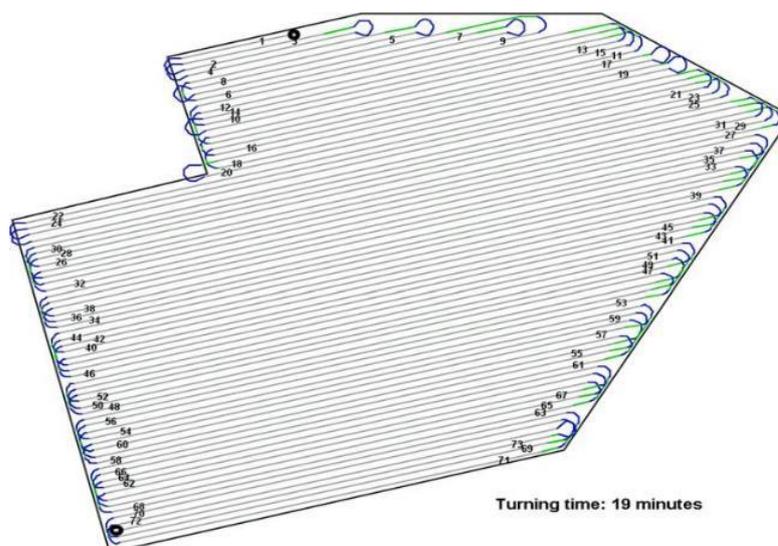
O teste também foi realizado utilizando outro campo experimental, porém fora do Brasil. O campo se localiza próximo da cidade de Wageningen, Holanda, mostrado na Figura 14 e que possui uma área de 1,87Ha sendo que o teste consistiu do planejamento de uma rota sem utilizar manutenção. Nesse experimento o objetivo foi encontrar a melhor rota, que é apresentada na Figura 15, a partir da verificação da angulação a ser seguida na direção de trabalho, encontrando uma diminuição de cerca de 50% no tempo de manobra.

**Figura 14: Campo experimental localizado na cidade de Wageningen, Holanda também utilizado no experimento**



**Fonte: Spekken e Bruin (2012)**

**Figura 15: Rota otimizada a partir da pesquisa realizadas utilizando o campo experimental localizado na Holanda**



**Fonte: Spekken e Bruin (2012)**

No entanto o algoritmo encontrou uma solução encontrou uma rota que diminuiria o número de paradas utilizando uma máquina auxiliar, no entanto, é preferível um número maior de paradas para que evitar a compactação do solo pelas máquinas auxiliares e o custo delas. O algoritmo foi capaz de otimizar uma rota em campos com geometrias muito diferentes e para diferentes operações. Um exemplo de aplicação também demonstrou que o método pode ser usado para selecionar máquinas com base em suas propriedades e na geometria de campos.

Santoro, Soler e Cherri (2017) também realizaram estudos sobre o planejamento de rotas em campos agrícolas brasileiros, no entanto o experimento focou nos campos que produzem cana-de-açúcar. Eles propuseram um modelo que minimiza o tempo de manobra da colheitadeira reduzindo assim os custos de combustíveis mão de obra, dentre outros. Os testes foram realizados em parceria com uma empresa sucroenergética que forneceu os dados dos campos localizados no estado de São Paulo para que fossem realizados testes computacionais. O modelo foi criado baseado no problema do carteiro rural. Com base nos testes, foi obtido uma redução de cerca de 31,64% do tempo utilizado ao se comparar com a colheita utilizando o processo tradicional de colheita. Ao se obter esse resultado, os autores ressaltas que além da redução no consumo de combustível se diminui o desgaste das maquinas de colheita e os custos da mão-de-obra aumentando assim o lucro da empresa. Outro benefício é a contribuição ambiental uma vez que se diminui a emissão de CO2 e outros gases.

Outro estudo que utilizou experimentos em campos com a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, foi Spekken et al (2016) com o objetivo de gerar padrões de caminhos em terrenos inclinados avaliando a suscetibilidade a erosão hídrica e sua abordagem compreendeu três etapas:

*“(1) montar um conjunto abrangente de faixas de referência e introduzir linhas de contorno híbridas; (2) ajustar estes trilhos curvos em trilhos paralelos e direcionáveis para máquinas agrícolas; e (3) avaliar o acúmulo de fluxo de água e a susceptibilidade à perda de solo do padrão correspondente.”*

O experimento foi realizado utilizando três campos localizados no município de Pradópolis, no estado de São Paulo e visualizado na Figura 16. E os testes apontaram que a perda do solo pode ser reduzida em cerca de 5 vezes incluindo uma única mudança no cultivo e ao ser comparada com o padrão realizado pelos operadores, o método proposto reduz em até 75%.

**Figura 16: Três campos localizados no município de Pradópolis-SP utilizados no experimento**



**Fonte: Santoro, Soler e Cherri (2017)**

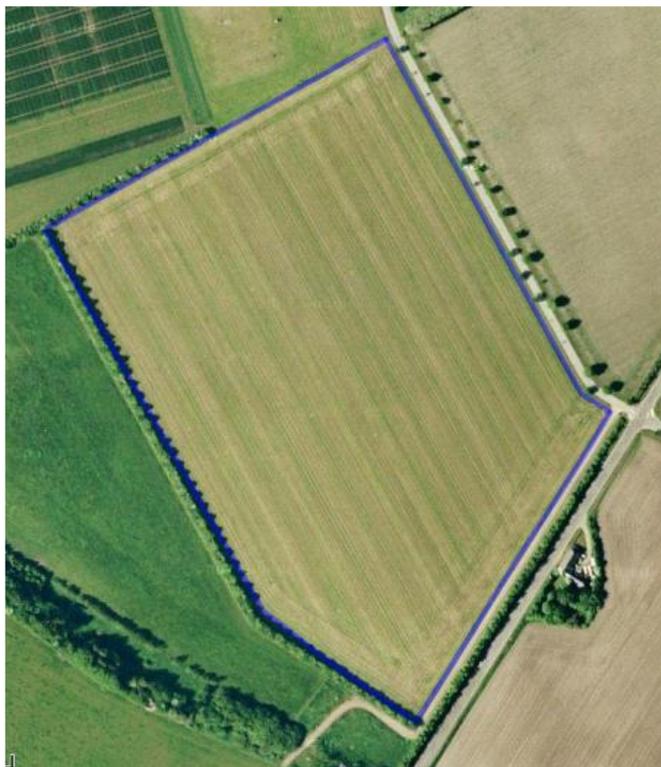
Souza et al (2015) também realizaram um estudo utilizando a cultura da cana-de-açúcar, no entanto o objetivo foi quantificar as propriedades do solo e o desenvolvimento das raízes da cana-de-açúcar comparando o manejo com tráfego controlado e sem tráfego controlado. Os experimentos também foram realizados na cidade de Pradópolis, estado de São Paulo e os resultados foram satisfatórios.

Souza et al (2012) realizou outro estudo, no entanto com o objetivo de comparar a capacidade de suporte de carga do solo também no cultivo de cana-de-açúcar comparando campos com e sem a utilização do tráfego controlado. Os experimentos foram realizados no mesmo campo experimental de Souza et al (2015) e os resultados apontaram que ao se realizar o manejo sem a utilização do tráfego controlado há uma maior capacidade de suporte de carga do solo, indicando uma maior compactação. Já ao se utilizar o manejo com o controle de tráfego, houve uma maior densidade radicular, ocasionando um reflexo positivo durante o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar.

### **3.5 A utilização de metaheurísticas**

Diversos trabalhos utilizaram metaheurísticas. Uma das metaheurísticas utilizada foi o Algoritmo Genético no trabalho realizado por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011), com o objetivo de desenvolver uma abordagem inicial combinando dois métodos relacionados ao problema de cobertura de campo, onde inicialmente gerou uma representação geométrica do campo e depois otimizou-se o roteamento veículos após a definição completa do campo. Para que a pesquisa fosse validada, foi realizado um experimento em duas áreas, localizadas na Dinamarca, sendo um campo convexo e um outro não convexo, em que o tempo calculado foi baseado na distância total percorrida, o que é equivalente ao comprimento da trilha somado ao tempo necessário para realizar a manobra de retorno. O campo convexo localiza-se no centro de pesquisas de Foulum e está representado na Figura 17 e possui uma área de 7,93ha. Nos testes inicialmente foi calculado o melhor ângulo para a condução que foi de  $29,98^\circ$  e obteve um tempo total de 1,22h.

**Figura 17: Campo convexo localizado no centro de pesquisa de Foulum utilizado no experimento**



Fonte: Hameed, Bochtis e Sorensen (2011)

Já o campo não convexo, representado na Figura 18 localiza-se na parte norte de Jutlândia e possui uma área de 17,2Ha, ao aplicar o algoritmo, encontrou-se um tempo de 2,66h.

**Figura 18: Campo não convexo que se localiza no norte de Jutlândia utilizado no experimento**



Fonte: Hameed, Bochtis e Sorensen (2011)

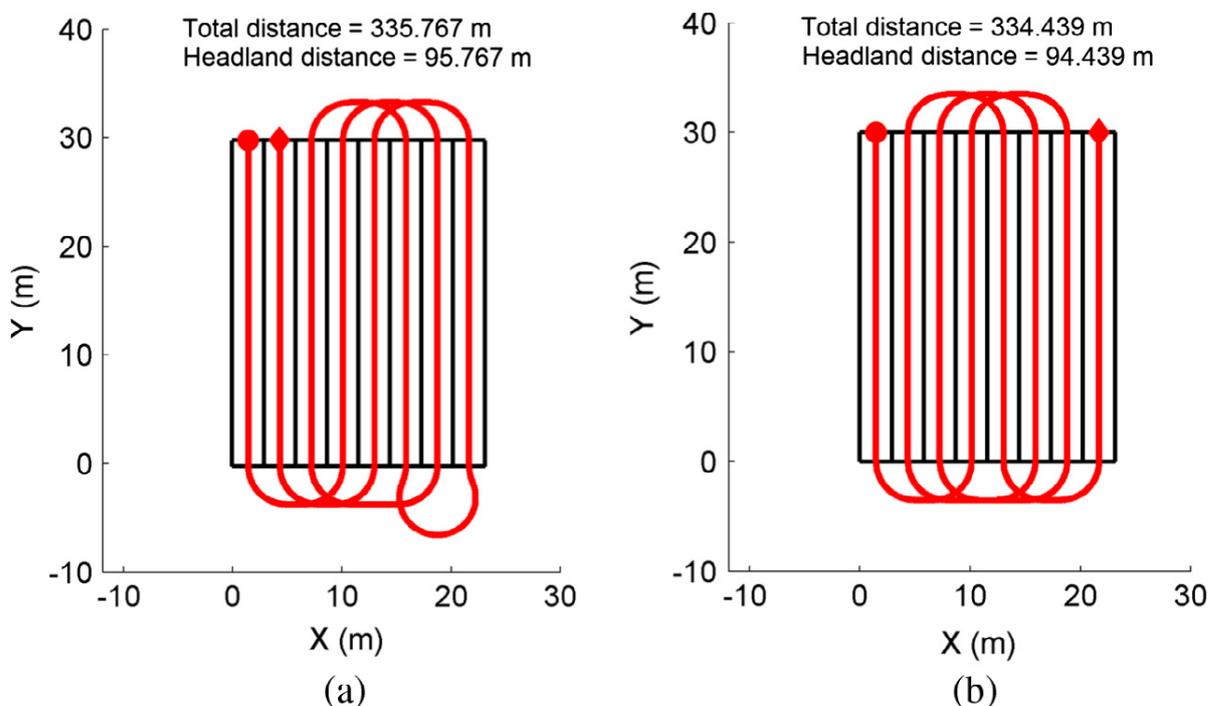
No entanto, quando os testes são comparados com o algoritmo desenvolvido por Bochtis e Vougioukas (2008), a abordagem proposta por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) não é eficiente, sendo que no campo convexo, o algoritmo desenvolvido por Bochtis e Vougioukas (2008) obtém uma distância total de 1017m resultando em um decréscimo de tempo de operação total para 1,09h o que representa uma redução de 12,4%, em relação ao Algoritmo Genético. Já no campo não convexo, foi encontrada uma distância de 1938m, o que foi realizado em um tempo total de 2,45h, o que representa uma diminuição de 13,1% em relação ao Algoritmo Genético.

Outro estudo que utilizou como base para comparação o estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008) foi Conesa-muñoz et al (2016) que também comparou seus resultados com o estudo realizado por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011). A abordagem proposta por Conesa-muñoz et al (2016) é pertinente para o planejamento de rotas na aplicação de herbicidas. Nele diversos critérios são considerados como, por exemplo, a distância percorrida, o tempo necessário para a finalização da tarefa e o custo dos insumos. Ela utiliza diversos veículos para a realização da tarefa de forma concomitante, e esses veículos possuem características diferentes, como por exemplo, o consumo de combustível, a velocidade de trabalho, a capacidade do tanque, o raio de viragem, dentre outros. Outra possibilidade é o reabastecimento que ao se fazer necessário o veículo deve retornar ao armazém durante o tratamento do campo. O estudo realizado por Conesa-muñoz et al (2016) foi desenvolvido no contexto do projeto europeu RHEA, que o objetivo foi o desenvolvimento de uma frota de robôs autônomos com diferentes capacidades para o tratamento de forma colaborativa de ervas daninhas.

Como esse estudo tem por objetivo determinar a rota ótima para que as trilhas sejam cobertas e o problema é descrito como uma otimização combinatória, Conesa-muñoz et al (2016) descreveu o problema como sendo uma extensão do bem conhecido CVRP, onde as trilhas são visitadas ao invés dos clientes e o tratamento é realizado ao invés de bens. Com isso Conesa-muñoz et al (2016) utiliza em seu estudo a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para a resolução do problema. Nos experimentos, a comparação da abordagem proposta por Conesa-muñoz et al (2016) com a proposta por Bochtis e Vougioukas (2008), o teste foi realizado em 4 campos, sendo que no primeiro a abordagem de Bochtis e Vougioukas (2008) obteve uma distância total de 335,767m, sendo 95,767

percorrida nas cabeceiras, já a abordagem proposta obteve uma distância total percorrida de 334,439m sendo 94,439m percorrida nas cabeceiras. A solução é apresentada na Figura 19.

**Figura 19: Comparação da solução apresentada em Bochtis e Vougioukas (2008) (a) e a solução do problema proposta por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) (b)**

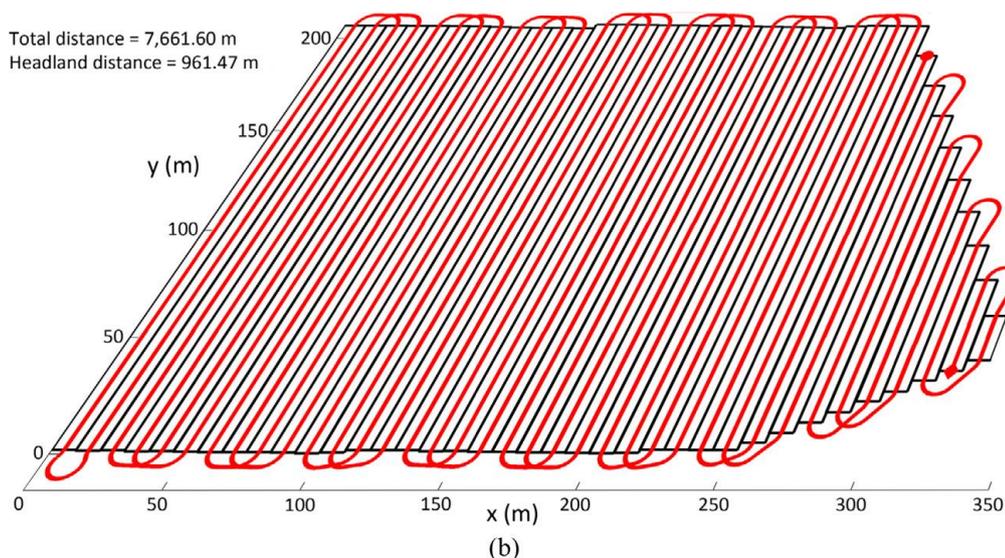
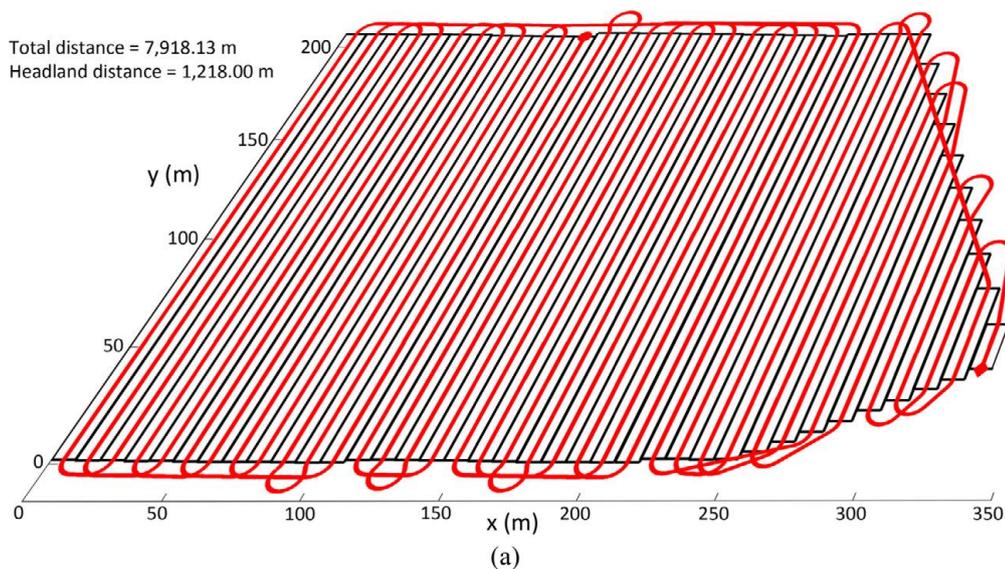


**Fonte: Conesa-muñoz et al (2016)**

Outro teste foi realizado, sendo que a trilha de entrada e a de saída foram definidas e em média foi encontrada uma melhoria de 17% na abordagem realizada por Conesa-muñoz et al (2016) quando comparado com a abordagem realizada por Bochtis e Vougioukas (2008).

Já na comparação com o estudo realizado por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) foi utilizado um teste realizado por ele e que pode ser replicado. Nele a distância total percorrida no estudo de Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) foi de 7918,13m sendo 1218m percorrido na cabeceira, já no estudo realizado por Conesa-muñoz et al (2016) obtiveram uma distância total de 7661,6, sendo 961,47m percorridos nas cabeceiras e o resultado é apresentado na Figura 20.

**Figura 20: Comparação da abordagem proposta por Hameed, Bochtis e Sorensen (2011) (a) com a proposta por Conesa-muñoz et al (2016) (b)**



**Fonte: Conesa-muñoz et al (2016)**

Também houve pesquisas que utilizaram a metaheurística de colônia de formigas, que foi combinado com o algoritmo de Clarke-Wright no trabalho de Zhou e Bochtis (2015), que definiram como sendo um problema de roteamento de veículos para a geração de rotas otimizadas. Para isso, o problema é abordado em duas partes. Primeiramente é feita uma representação geométrica do campo, que é dividido em partes: a área de cabeceira e o corpo do campo que é a principal área de cultivo. A segunda parte é encontrar a rota otimizada, que é formulada como o problema de veículo capacitivo (CVRP). Os experimentos foram realizados no centro de pesquisas de Foulum, Dinamarca, utilizando dois campos experimentais e foram comparados com a estratégia denominada convencional, descrita por Bochtis e

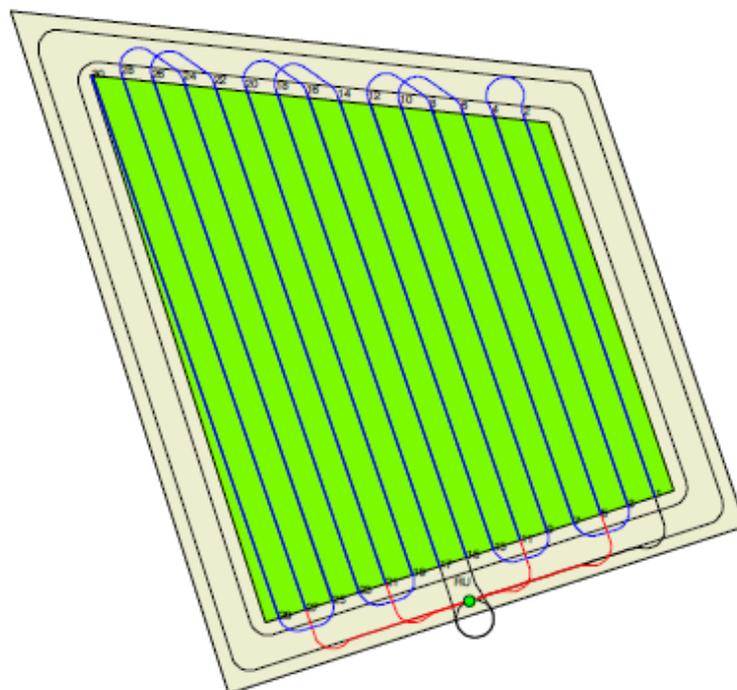
Sorensen (2010). O primeiro mostrado na Figura 21 e possui uma área de 3,3ha e com a utilização do algoritmo proposto por Zhou e Bochtis (2015) obteve uma rota em que a distância de não trabalho foi de 662,4m mostrada na Figura 22, enquanto ao utilizar a estratégia convencional, a distância de não trabalho foi de 1250,4m.

**Figura 21: Campo de experimento denominado A Localizado na Dinamarca, mais precisamente no centro de Pesquisa de Foulum**



Fonte: Zhou e Bochtis (2015)

**Figura 22: Rota otimizada gerada pelo algoritmo para o campo denominado A do centro de pesquisa de Foulum, Dinamarca**



Fonte: Zhou e Bochtis (2015)



Com isso ao ser comparado os resultados, foi encontrada uma melhoria de 47,02% no primeiro experimento e 49,76% no segundo campo.

Hameed (2013) realizou seu estudo utilizando as três dimensões, ou seja, latitude, longitude e altitude, uma vez que se notou a possibilidade de uma maior precisão no planejamento de rotas. Para isso, Hameed (2013) utilizou Algoritmos genéticos para a validação em dois campos experimentais e quando se compara o comprimento total da pista utilizando a abordagem 2D e 3D, verifica-se o aumento da distância da trilha. Nos experimentos foram utilizados dois campos sendo que o campo denominado A, possui uma área de 11,24ha, e possui uma elevação mínima de 20,89m, média de 32,88m e máxima de 42,96m e ao comparar a abordagem 3D e 2D houve uma diminuição significativa no tempo de trabalho de cerca de 15,4%.

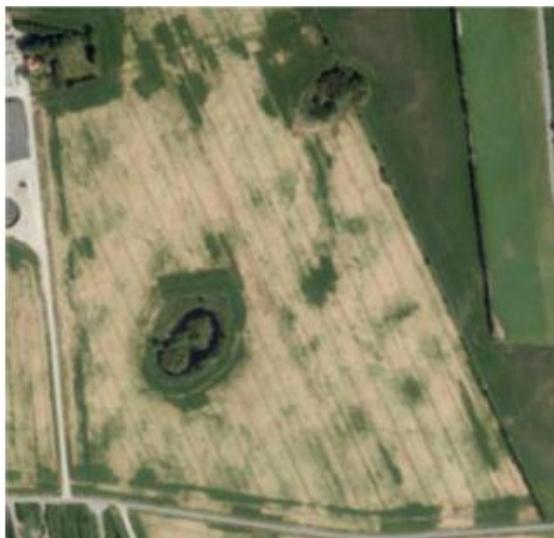
**Figura 25: Campo denominado A utilizado na experiência que utiliza latitude, longitude e altitude**



**Fonte: Hameed (2013)**

Já no experimento denominado B, representado na Figura 26, e que possui uma área de 21,22ha tendo uma elevação mínima de 18,68m, 42,96m máxima e em média 35,77m, houve uma redução média no tempo de 10,96%.

**Figura 26: Campo denominado B utilizado no experimento que utilizou Algoritmos Genéticos**



**Fonte: Hameed (2013)**

Com esse resultado, Hameed (2013) aponta um melhor rendimento como resultado na redução da área de cabeceira e consequente redução na degradação do solo e fertilidade devido a compactação e condução excessiva. Também, notou-se uma redução de cerca de 10% a 15% no tempo operacional e uma significativa redução no consumo de combustível, ao se otimizar o caminho em um terreno 3D.

### **3.6 A utilização de múltiplos implementos**

Na pesquisa realizada por Seyyedhasani e Dvorak (2018), foi utilizado procedimentos de otimização para o problema de trabalho em campos agrícolas a partir da transformação do problema de roteamento de veículos – VRP e utilizando a metaheurística de busca-tabu. Os experimentos foram realizados em 3 áreas e as principais pesquisas foram realizadas em duas áreas, mostradas na Figura 27 que se localizam no Centro de Pesquisa *C. Oran Little* localizado na Universidade de Kentucky, na cidade de Versailles nos Estados Unidos onde o campo mostrado como (a) possui uma área de 12,1 ha e o campo mostrado com (b) possui uma área de 3,5 ha, totalizando 15,6 ha. O terceiro experimento foi realizado no Condado de Logan, também no estado do Kentucky, possuindo uma área de aproximadamente 71,5ha, visualizado na Figura 28.

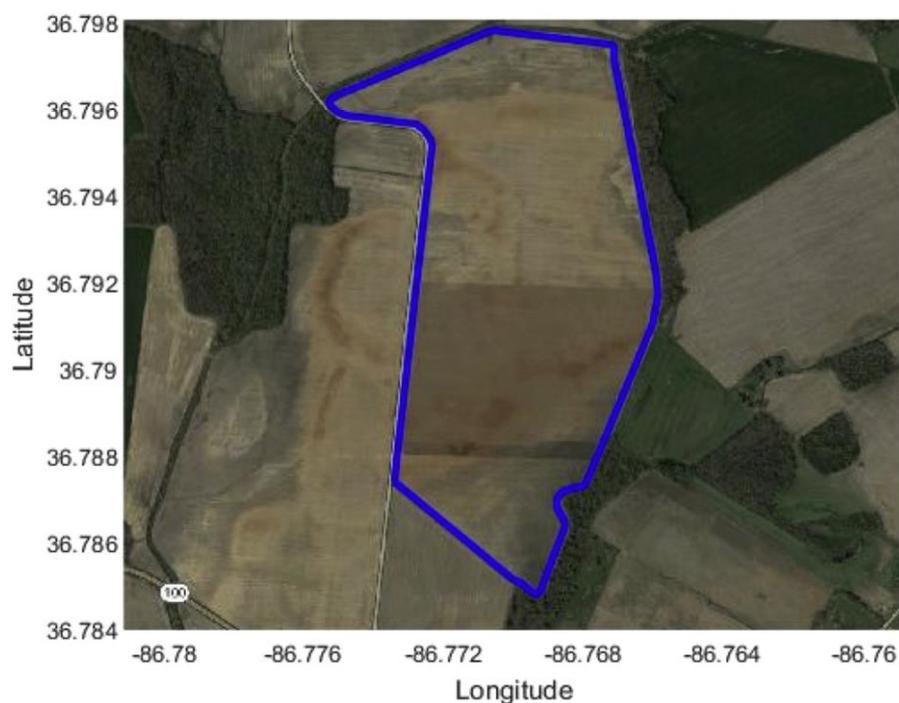
**Figura 27: Campos experimentais do Centro de pesquisa C. Oram Little, da universidade do Kentucky**



**Fonte: Seyyedhasani e Dvorak (2018)**

A validação do método foi realizada utilizando a comparação entre as rotas tradicionais geradas pelos motoristas humanos, e a rota realizada utilizando o método proposto. Ao se comparar os dois métodos utilizados o método proposto reduziu em 17,5% o tempo para completar o trabalho, já no tempo total de operação para todos os tratores houve uma redução de 11,5%, o que mostra que a utilização do processo de otimização pode melhorar a eficiência do campo.

Em outro estudo, Seyyedhasani e Dvorak (2018) desenvolveram um método que utiliza o VRP para realizar o recálculo dinâmico das rotas, testando percursos que em muitas vezes necessitavam que os veículos fossem reencaminhados e comparando-os com as rotas originais determinando assim a eficácia do método proposto visando verificar diversos parâmetros como a capacidade, tempo de trabalho e a eficácia. Para isso, foi utilizado o método Clark-Wright com modificações. A validação do método foi realizada utilizando como exemplo um campo localizado no Condado de Logan no estado do Kentucky nos Estados Unidos, visualizado na Figura 28. Os resultados demonstraram que a melhoria depende da tarefa que exigiu o reencaminhamento. Já ao se realizar a inserção de novas máquinas o tempo de conclusão pode ser reduzido.

**Figura 28: Campo experimental localizado no Condado de Logan**

Fonte: Seyyedhasani e Dvorak (2018)

### 3.7 Outros estudos

O estudo realizado por Taix et al (2006), foi realizado em parceria com a *Renault Agriculture*, para a utilização em tratores autônomos de alta tecnologia, na cobertura de campos convexos. Durante os experimentos, foram encontrados resultados satisfatórios, no sentido de serem realistas e próximas das práticas atuais dos agricultores.

Buscando a redução da compactação do solo de vinhedos localizados em encostas íngremes, Santos et al (2018) propôs um método baseado no algoritmo A-estrela e realizou testes na região de Douro em Portugal, patrimônio da UNESCO, mostrada na Figura 29. Os estudos foram realizados utilizando diversos robôs que possuíam diversos tipos de tração e os resultados demonstraram que a compactação do solo é minimizada ao se diminuir o peso do robô e aumentar a velocidade durante a realização da atividade.

**Figura 29: Região de Douro em Portugal utilizada no estudo que utilizou para resolução o Algoritmo A-Estrela**



Fonte: Santos et al (2018)

Também houve estudos realizados na China, mais precisamente na vila de Huaguang, cidade de Tangji, distrito de Huaiyuan, província de Anhui que podem ser visualizados na Figura 30.

**Figura 30: Região da área utilizada no estudo realizado na China, na cidade de Tangji**



Fonte: He et al (2018)

O estudo realizado por He et al (2018) objetivou minimizar o período da colheita do trigo em áreas fragmentadas que juntas possuíam cerca de 442,963 acres visualizadas na Figura 31 e na Figura 32. Para isso foi proposto o método Busca-tabu híbrida e os resultados apontaram que o tempo de colheita pode ser reduzido em cerca de 10% ao se utilizar o modelo proposto.

**Figura 31: Parte das áreas fragmentadas do campo utilizado o método de Busca-Tabu híbrida**



Fonte: He et al (2018)

**Figura 32: Continuação dos Campos utilizados no estudo que utilizou a Busca-Tabu Híbrida para o processo de colheita**



Fonte: He et al (2018)

Lal, Sharda e Prabhakar (2017) desenvolveram um estudo cujo objetivo foi minimizar a distância percorrida e com isso o consumo de combustível utilizando robôs com restrições a quantidade de pesticidas por eles armazenados. Para isso, foi utilizado programação linear inteira mista e reduziram ao problema do caixeiro-viajante com múltiplos vendedores, onde os vendedores não precisam visitar todas

as cidades, mas sim uma cidade em um grupo e ao final todas as cidades são visitadas por um vendedor. O campo não é dividido em faixas e sim em células formando um grid. Os resultados apontaram a viabilidade do método quando há um aumento no tamanho do grid, porém como foram realizados testes sem a utilização de campos agrícolas reais os autores sugerem que sejam realizados experimentos a fim de identificar potenciais desafios para serem resolvidos.

Além dos estudos já citados, Spekken e Bruin (2011) realizaram um estudo com o objetivo de criar um método que otimize as rotas e que considere a manutenção dos maquinários. Para isso são considerados dois conjuntos de variáveis: a direção e o comprimento da trilha e foi implementado utilizando macros Visual Basic no Microsoft Excel e testados em diversos campos com diversos polígonos e tamanho. Os locais dos experimentos se localizam na Universidade de Wageningen na Holanda e podem ser vistos na Figura 33 e estão descritos com os números 1, 2 e 3. No projeto foram implementadas melhorias na determinação das cabeceiras levando em consideração diversos fatores como por exemplo a rotação da máquina e direções de trabalho o que ocasiona uma otimização de questões como a perda da área para manobrar e impactos na área de cabeceira como por exemplo a compactação do solo

**Figura 33: Campos experimentais da Universidade de Wageningen na Holanda**



fonte: Spekken e Bruin (2011)

### 3.8 Considerações Finais

As pesquisas relacionadas ao problema do roteamento de veículos em campos agrícolas têm se mostrado importantes ao meio agrícola sendo realizadas diversas pesquisas com múltiplos objetivos, dentre eles os mais comuns são a melhoria na distância percorrida durante o processo da realização das manobras de retornos nas cabeceiras, a redução do consumo de combustível, diminuição da compactação do solo, dentre outros.

Um dos primeiros estudos foi realizado na Holanda, país que têm realizado diversas pesquisas, e pode-se citar os pesquisadores Spekken e Bruin, autores que são de fundamental importância para a realização deste trabalho. Outro país com destaque as pesquisas é a Austrália que há diversos estudos e diversos pesquisadores envolvidos neste tema. Também há estudos realizados no Brasil e com diversos experimentos realizados utilizando a cultura da cana-de-açúcar. Também há experimentos realizados na Grécia, Estados Unidos, dentre outros países. Um resumo dos trabalhos é apresentado na Tabela 1 que apresenta os autores, o objetivo, o resultado encontrado e o país que foram realizados os experimentos.

Na Tabela 1 pode-se observar que as pesquisas relacionadas ao planejamento de rotas em campos agrícolas têm sido realizadas em diversas partes do mundo com pesquisas recentes. Nela verifica-se ainda que os objetivos principais dos estudos são voltados para a redução da compactação do solo e a distância percorridas durante as manobras de cabeceira o que conseqüentemente diminui a quantidade de combustível consumido. Os resultados dos experimentos mostram em sua maioria a validade dos estudos o que mostra a viabilidade deste estudo que possui como objetivo a melhoria da compactação do solo e a otimização da distância das cabeceiras diminuindo assim a quantidade de combustível consumido.

Tabela 1: Resumo dos Artigos Relacionados

Autor	Ano	Local	Objetivo	Método utilizado	Conclusão
Lamers et al.	1986	Holanda	Possibilidade de adoção	Não informado	Não adoção
Tullberg, Yule e Mcgarry	2007	Austrália	Possibilidade de adoção	Não informado	Viabilidade para a adoção
Tullberg et al,	2018	Austrália	Emissão de gases	Não informado	Redução em até 50% da emissão
Luhaib et al	2017	Austrália	Compactação do solo	Não informado	Melhoria em cerca de 40%
Bochtis e Vougioukas	2008	Grécia	Minimizar distância de cabeceira	Método Clark-Wright	Diminuição da distância percorrida na manobra
Spekken e Bruin	2012	Holanda Brasil	Reduzir o tempo não produtivo		Diminuição do tempo de manobra
Santoro, Soler e Cherri	2017	Brasil	Minimizar o tempo de colheita da Cana-de-açúcar		
Spekken et al	2016	Brasil	Padrões de caminhos em campos inclinados suscetíveis a erosão		Redução na perda do solo em cerca de 5 vezes
Souza et al	2015	Brasil	Quantificar as raízes		Aumento das raízes em cerca de 44%
Souza et al	2012	Brasil	Suporte a carga do solo e compactação do solo		Maior densidade radicular menor compactação do solo
Hameed, Bochtis e Sorensen	2011	Dinamarca	Cobertura do campo	Algoritmos Genéticos	Ineficiência ao se comparar com Bochtis e Vougioukas (2008)
Conesa-muñoz et al.	2016	Espanha	Trilhas para a aplicação de herbicidas	Simulated Annealing	Diminuição da distância ao se comparar com outros estudos
Zhou e Bochtis	2015	Dinamarca	Otimização das rotas	Algoritmo de colônia de formigas com	Diminuição da distância percorrida

				algoritmo de Clarke-Wright	
Hameed	2013		Otimização em campos utilizando 3 dimensões	Algoritmos genéticos	Redução na área da cabeceira e melhor rendimento
Seyyedhasani e Dvorak	2018	Estados Unidos	Otimização da distância e tempo de trabalho	Busca-tabu	Diminuição no tempo de trabalho
Seyyedhasani e Dvorak	2018	Estados Unidos	Recalculo dinâmico das Rotas	Clark-Wright com modificações	Melhoria dependente da tarefa e tempo de conclusão reduzido ao se inserir novas máquinas
Taix et al.	2006	França	Utilização de tratores autônomos	Não informado	Resultados satisfatórios
Santos et al	2018	Portugal	Redução da compactação do solo em vinhedos	Algoritmo A*	Diminuição da compactação do solo ao se aumentar a velocidade e diminuindo o peso
He et al	2018	China	Minimizar o período de colheita em campos fragmentados	Busca-tabu híbrida	Tempo de colheita pode ser reduzido em até 10%
Lal, Sharda e Prabhakar	2017		Minimizar a distância percorrida	Programação linear	O método é viável, no entanto deve-se realizar testes utilizando campos reais
Spekken e Bruin	2011	Holanda	Otimização das rotas considerando manutenção dos maquinários		Redução em relação ao tempo de trabalho necessário.

# Capítulo 4

## IMPLEMENTAÇÃO

---

Na proposta de otimização de rotas na agricultura o campo deve ser dividido em faixas paralelas (Bochtis; Vougioukas, 2008) após se verificar a direção de trabalho maximize a eficiência de trabalho. Nestas faixas os veículos se deslocam de forma alternada de uma ponta a outra, realizando uma manobra na cabeceira para seguir para outra faixa que ainda não foi visitada. Além disso, cada faixa possui largura semelhante a largura do equipamento, também definida como largura de trabalho (Conesa-Muñoz; Pajares; Ribeiro, 2016).

O passo a passo do processo proposto é descrito a seguir.

### 4.1 O Processo da implementação

Como cada faixa se inicia em um limite do campo e finalizando na extremidade oposta, o comprimento da faixa é definido como o comprimento da área e a largura de cada faixa é definida pela largura de operação do maquinário. Com os valores da largura de trabalho do maquinário e da largura do campo, é possível definir a quantidade de faixas que cobrem a área a ser percorrida no campo (BOCHTIS; VOUGIOUKAS, 2008). Seja  $T = \{1,2,3, \dots\}$  o conjunto dos índices das faixas,  $l$  a largura total do campo e  $w$  a largura de operação da máquina, a quantidade total de faixas é definida a partir do cálculo utilizando a equação expressa em (13)

$$\frac{l}{w} \leq |T| \leq \left( \left\lfloor \frac{l}{w} \right\rfloor + 1 \right) \quad (13)$$

A implementação é baseada no Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (CVRP), um problema NP-Difícil, que da mesma forma é baseado no problema do caixeiro-viajante (CONESA-MUÑOZ et al., 2016).

A implementação realizada neste estudo divide o processo de planejamento de trajetória em campos agrícolas em duas etapas. A primeira é realizar a divisão do campo em faixas, utilizando a largura de trabalho do implemento e a direção de trabalho, ou seja, a angulação em relação a latitude e longitude que será realizada. Esta primeira etapa é realizada utilizando o arquivo de extensão .xls que foi gerado no estudo de Spekken e de Bruin (2012).

A segunda etapa, consiste na definição da sequência de faixas que otimiza os critérios de custo (CONESA-MUÑOZ; PAJARES; RIBEIRO, 2016). Esta etapa é realizada a partir da metaheurística Otimização por Enxame de Partículas – PSO, com algumas modificações e utilização da Otimização por Colônia de Formigas – ACO, como metaheurística auxiliar.

Como forma de se verificar a validade da implementação foram utilizados alguns campos utilizados por Bochtis e Vougioukas (2008) comparando o resultado apresentado nos estudos com o método implementado. Também foram utilizados dados reais de dois campos localizados em diferentes regiões do estado do Mato Grosso do Sul.

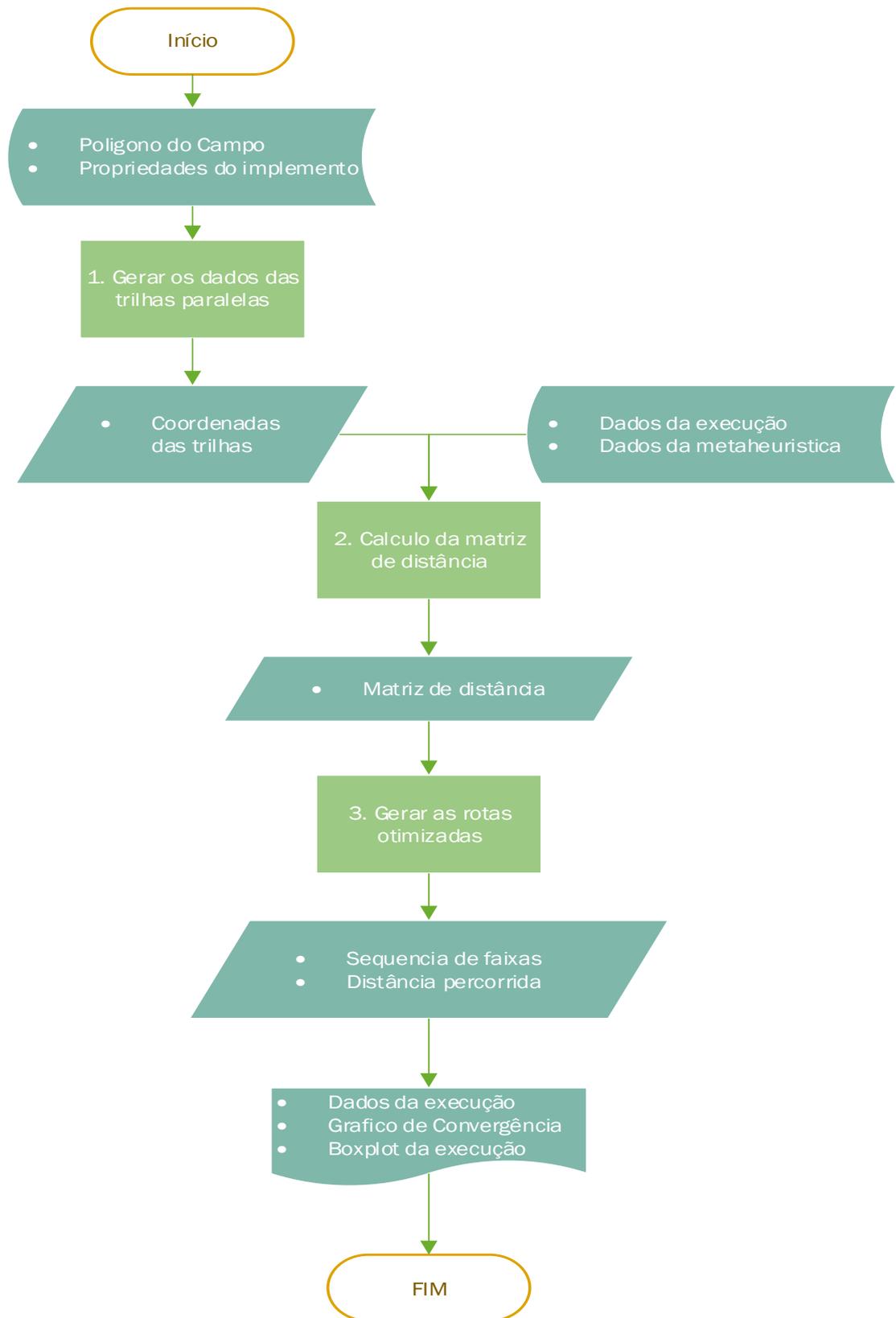
## 4.2 Modelo Conceitual

O método implementado pode ser dividido em passos que são:

- Entrada dos dados
- Gerar as trilhas, cabeceiras e direção de trabalho
- Gerar a matriz de distância entre as trilhas
- Obter o trajeto otimizado através da metaheurística
- Apresentar os dados de saída

O passo a passo pode ser melhor visualizado no fluxograma apresentado na Figura 34.

Figura 34: Fluxograma do passo a passo de execução do método implementado



Fonte: Os autores

Nos tópicos a seguir, cada seção do fluxograma é explicada.

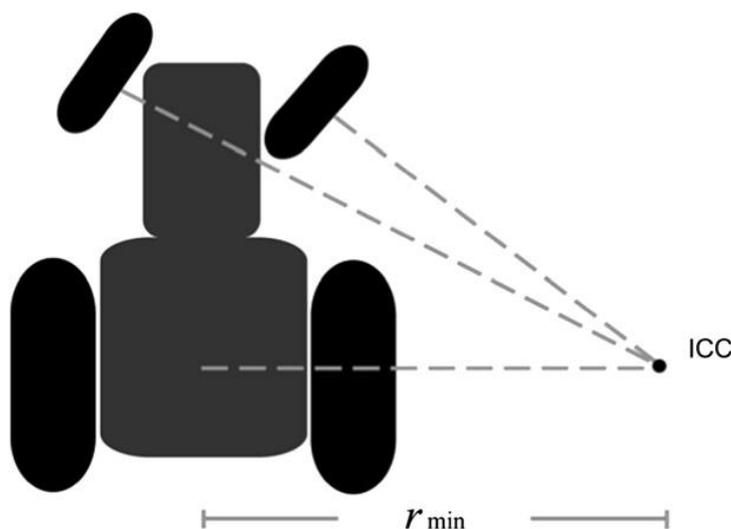
### 4.2.1 Dados de Entrada

Para a execução do algoritmo, deve-se utilizar as seguintes entradas: Características da Execução, Polígono do campo, Propriedades do implemento utilizado e as características das metaheurísticas.

O polígono do campo é dado pelas coordenadas das extremidades, selecionando o arquivo com extensão “.kml”. Um arquivo kml é um padrão para se representar dados geográficos, e segue o padrão XML pré-definido. Ele pode ser utilizado para diversas finalidades, dentre elas, sobreposição de imagens, especificar locais na superfície terrestre, e definir caminhos (Ferreira et al, 2012).

As propriedades do implemento necessárias são a largura de trabalho e o raio necessário para a realização do movimento de rotação do implemento, aqui definida como raio de viragem ou simplesmente raio. A largura de trabalho pode ser definida como a distância que o implemento consegue cobrir durante a realização de um determinado trabalho. O raio de viragem é a distância do centro de curvatura instantâneo (ICC) ao ponto médio no entre as rodas, conforme pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35: Raio mínimo de giro do veículo, utilizando a geometria de Ackerman



Fonte: Bochtis, Vougioukas, 2008

Os dados do polígono do campo e as propriedades dos implementos são inseridas em um arquivo de planilha do tipo do Microsoft Excel – extensão xls ouxlsx, que foi adaptado do estudo realizado por Spekken e Molin (2008) que verifica qual a melhor angulação para se realizar a tarefa e também gera a localização que cada trilha se encontra, além de gerar a cabeceira.

As características da execução necessárias são os dados que são comuns durante a realização das metaheurísticas. São eles: a quantidade de execuções, a quantidade de iterações realizadas em cada execução, e a quantidade de permutações realizadas em cada iteração.

Já as características da metaheurística necessária na execução, são os parâmetros que realizam os “ajustes” durante a execução da metaheurística. O PSO necessita diversos parâmetros de entrada: a quantidade de partículas e os coeficientes de confiança para a solução atual, para a melhor solução da partícula e para a melhor solução entre todas as partículas.

#### **4.2.2 Gerar a direção de trabalho e as trilhas paralelas**

Para a execução do método proposto, é necessário que se tenha a localização das trilhas, assim como a direção do trabalho. Estes dados são gerados utilizando uma planilha de dados com formato da pasta de trabalho do Microsoft® Office Excel (extensão xls ouxlsx) que utiliza macros implementadas em Visual Basic.

Os dados dos campos devem ser inseridos utilizando as coordenadas das extremidades das bordas do campo no formato UTM – Universal Transversa de Mercator.

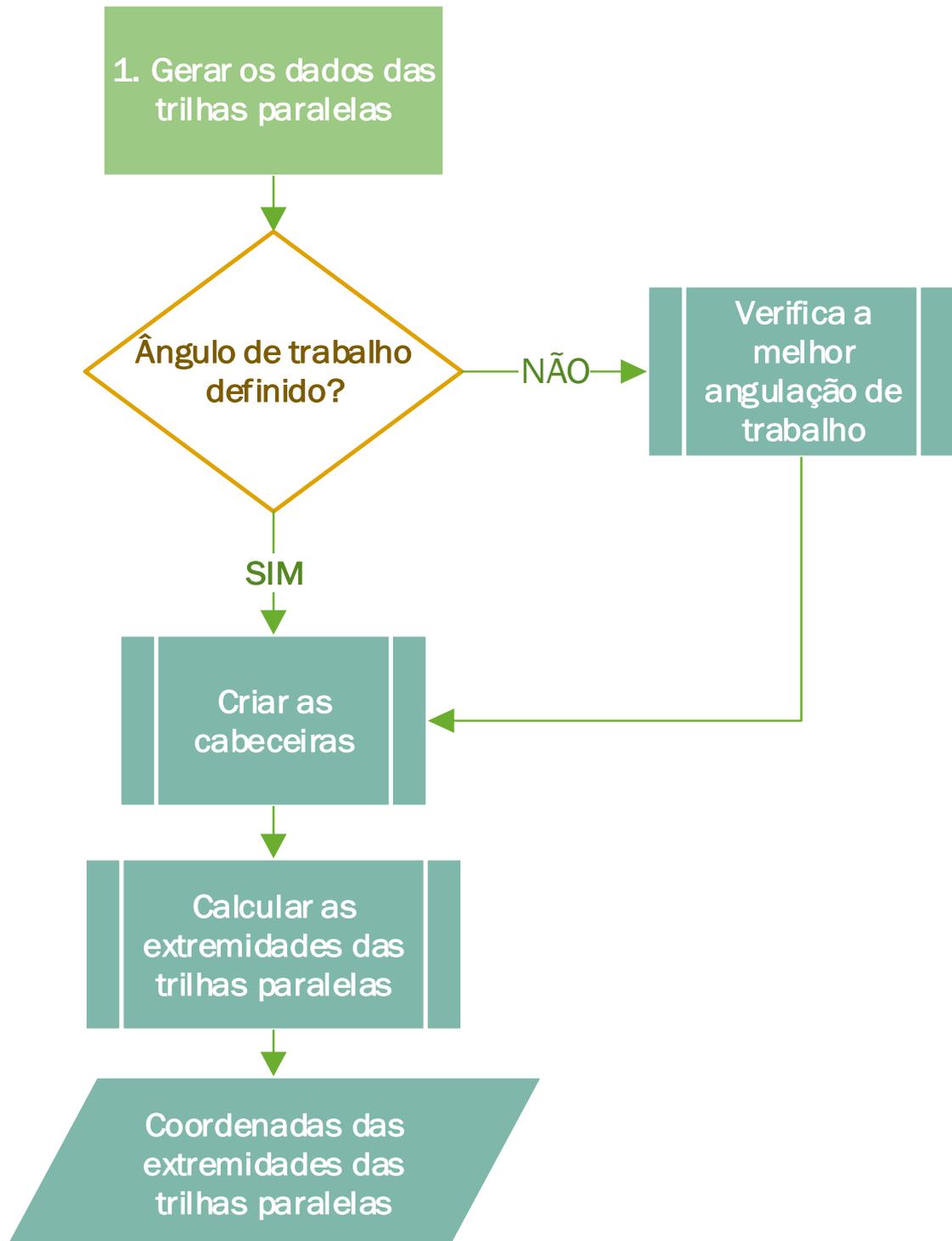
A direção de trabalho é calculada de forma que seja gerada a menor quantidade de trilhas. Ela também pode ser criada a partir do fornecimento de uma angulação específica.

As trilhas são criadas utilizando a largura de trabalho do maquinário e geradas a partir das coordenadas das bordas, seguindo a direção de trabalho previamente calculada.

Os resultados gerados são as coordenada das bordas de cada trilha que serão utilizadas durante o cálculo da matriz de distância.

A especificação das etapas é descrita no fluxograma mostrado na Figura 36.

Figura 36: Fluxograma do processo obtenção da angulação e coordenada das trilhas paralelas



Fonte: os autores

### 4.2.3 Cálculo da matriz de distância

Após as trilhas serem geradas, é realizado o cálculo das distâncias entre os pontos das trilhas, onde os pontos que estão na mesma trilha, é calculado o comprimento da trilha. Já quando um ponto se liga ao ponto de outra trilha, é verificada a distância entre eles para que seja definida qual a manobra de retorno será utilizada: volta- $\pi$  ou volta- $\Omega$ . A definição da manobra de retorno, é calculada através da equação expressa em (14).

$$L_{min}(d) = \begin{cases} \Omega, d < \frac{2r_{min}}{w} \\ \Pi, d \geq \frac{2r_{min}}{w} \end{cases} \quad (14)$$

Quando os pontos estão em bordas diferentes, inicialmente é calculado a distância do ponto inicial até a extremidade da borda que ele se localiza e do ponto final a extremidade da borda que ele se localiza, somando-os. Também se soma a largura das bordas que se localizam entre as bordas dos pontos que está sendo calculado as distâncias.

### 4.2.4 Obtenção da Rota otimizada

No processo de obtenção da rota otimizada, inicialmente deve-se gerar o conjunto de rotas chamadas nas metaheurísticas de população. Uma rota, pode ser definida como o caminho a ser percorrido pelo implemento e deve-se passar por todas as trilhas. Esse conjunto de rotas é uma matriz e cada linha representa uma rota e é gerada da seguinte forma: Inicialmente seleciona-se um ponto aleatoriamente. O próximo passo é definir o ponto que se localiza na mesma trilha, chamado de percorrer a trilha. Após percorrer a trilha, o próximo ponto é definido utilizando o método chamado roleta, verificando se a trilha já foi inserida na rota. Esse passo é realizado até que não possua mais trilhas a serem percorridas.

A população é criada em cada metaheurística, que realiza a quantidade de iterações na quantidade de execuções definidas no início do algoritmo.

A implementação do Algoritmo PSO, foi realizada utilizando o pseudocódigo proposto por Karaboga e Akay (2009), e foi utilizada a equação expressa em (3)

para realizar o cálculo da velocidade para atualização da partícula e a equação expressa em (4) para a atualização da partícula.

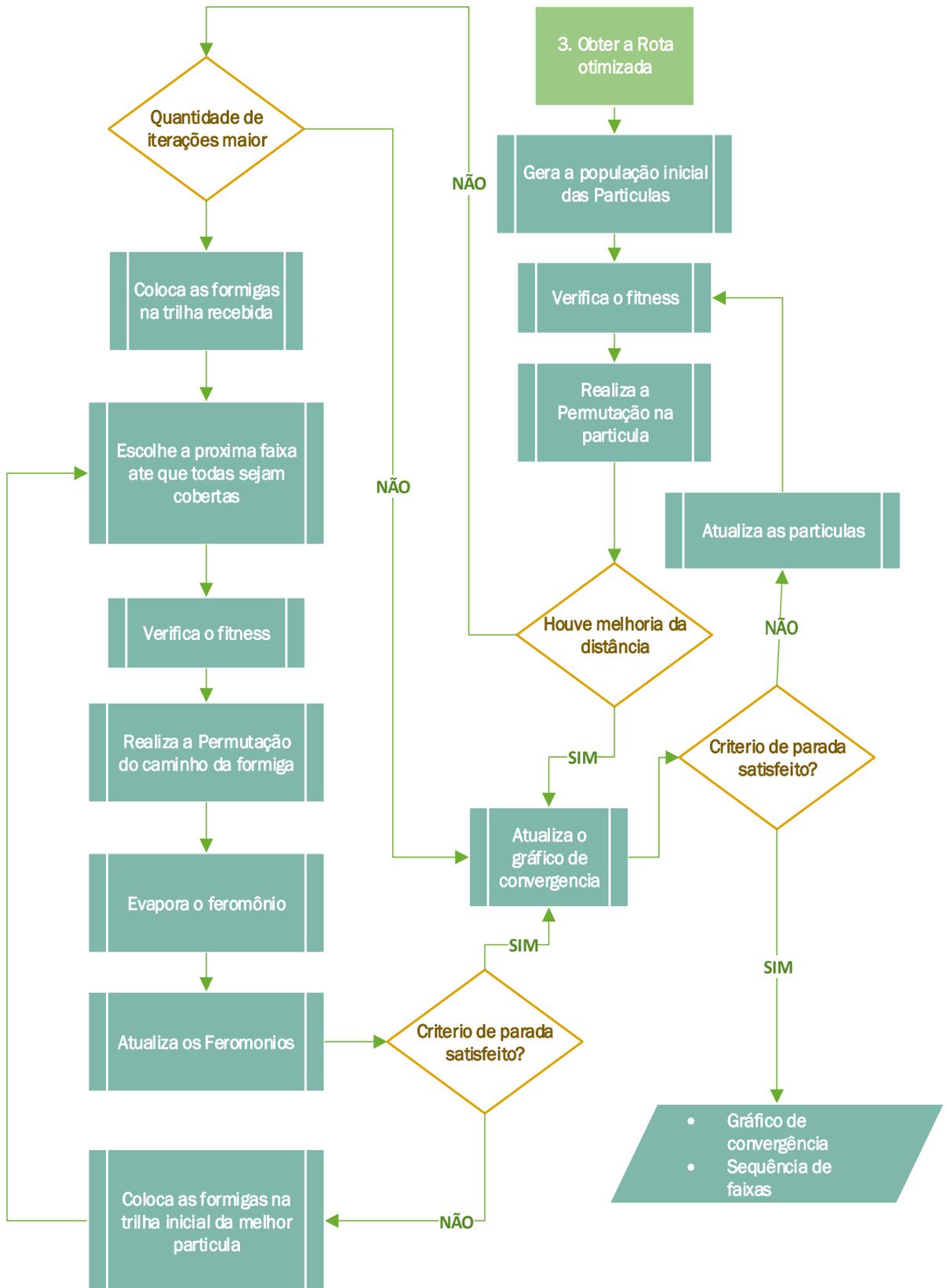
Durante a atualização da partícula é realizada a permutação das faixas, para realizar uma busca local verificando se a distância é melhorada. Além de se realizar a permutação, é verificada a quantidade de iterações em que não há melhoria na distância da melhor partícula e caso a quantidade seja superior a predefinida, é realizada a execução do ACO.

O ACO foi implementado utilizando como base o algoritmo definido por Dorigo e Gambardella (1997), que realiza a escolha da próxima faixa de acordo com a equação expressa em (6) evaporando os feromônios utilizando a equação expressa em (7) e atualizando-os de acordo com a equação expressa em (8). Porém o início não é encontrado de forma aleatória, inicializando as partículas na trilha inicial recebida pelo PSO. Também é realizada a permutação nas formigas afim de se realizar a busca local no trajeto da formiga. Com isso é verificada a menor distância que uma formiga encontrou, inicializando as formigas da próxima iteração na trilha inicial da melhor formiga encontrada.

O cálculo dos fitness é realizado verificando as distâncias entre os pontos do caminho encontrado pelo algoritmo e utilizando as distâncias calculadas e salvas na matriz de distância

O fluxograma apresentado na Figura 37 mostra os passos seguidos pelo algoritmo no processo de se obter a rota otimizada.

Figura 37: Fluxograma do processo de obtenção da rota otimizada



Fonte: os autores

### 4.2.5 Dados de Saída

Com a finalização das execuções, é apresentado como resultado as rotas otimizadas encontradas pelo algoritmo, salvando em um arquivo os dados da execução que contêm os parâmetros de inicialização, as coordenadas da rota otimizada e a distância total. Outros arquivos que também são guardados são o gráfico de convergência e o boxplot das execuções da metaheurística.

## 4.3 Ferramentas utilizadas

A implementação deste estudo foi realizada utilizando a linguagem MATLAB que é uma linguagem de alto desempenho focada na computação técnica e que integra a computação, visualização e programação. Ele também é um ambiente de programação moderno que possui estruturas de dados modernas, suporte a orientação a objetos e além de conter ferramentas voltadas para a edição e depuração integradas, que o torna uma excelente ferramenta para o desenvolvimento de pesquisa (Houcque, 2005). Outro motivo que culminou com a escolha do MatLab em sua versão 2018a foi sua simplicidade para o acesso e a realização de cálculos utilizando vetores multidimensionais (HAHN; VALENTINE, 2013).

Outra ferramenta utilizada foi o software de planilhas eletrônicas Excel 2016, da suíte de aplicativos Office 365, utilizado devido a sua compatibilidade com o arquivo de extensão xls necessário a este estudo.

## 4.4 Método Implementado

Para que fosse realizada a otimização das rotas, inicialmente foram necessárias as coordenadas das trilhas paralelas. Para isso diversos dados são necessários como os dados do maquinário utilizado (a largura de trabalho e o raio de manobra) e as coordenadas das extremidades das bordas do campo. Essas

coordenadas devem ser coordenadas planas UTM. Devido ao estudo realizado por Spekken e Bruin (2011) realizar esta mesma ação, foi utilizado o arquivo desenvolvido no estudo e fornecido a este estudo pelo autor Mark Spekken que autorizou a sua modificação para que pudesse ser utilizado. Este arquivo consiste em uma planilha do Microsoft Excel que utiliza macros desenvolvidas em Visual Basic.

A modificação foi necessária para houvesse a informação das coordenadas das extremidades trilhas que cortam o campo para a realização das atividades agrícolas. Além disso, cada coordenada é representada como um ponto, ou seja, cada trilha contém dois pontos.

Este arquivo no formato de planilha do Excel realiza a primeira etapa do processo e com a finalização desta tarefa, o arquivo deve ser importado na implementação aqui realizada.

Com o arquivo selecionado, o próximo passo é gerar a matriz de distância entre os pontos das extremidades de cada faixa. O algoritmo que cria a matriz de distância é calculado da seguinte forma:

- Se os pontos pertencem a mesma trilha, então a distância é o comprimento da trilha.
- Se os pontos estão em trilhas diferentes, porém na mesma borda, então é calculada a distância entre as trilhas e verificado de acordo com a largura de trabalho e o raio de manobra e definido qual a manobra deve ser realizada a partir da equação expressa em (6)
- Caso os pontos não estejam na mesma trilha e também não estão na mesma borda, é calculada a distância do ponto até a extremidade da borda e a distância das bordas até estar na borda que contém o outro ponto, somando estas distâncias com a realização da manobra de retorno do tipo II.

O próximo passo é definir a quantidade de execuções que serão realizadas e também os dados necessários para a execução da metaheurística que são: a quantidade de iterações que serão realizadas, utilizado como critério de parada, a quantidade de partículas, os coeficientes de confiança tanto para a vizinhança como para si.

A quantidade de execuções utilizada foi de 10 execuções, enquanto a quantidade de iterações e a quantidade de partículas é baseada no princípio de

Pareto e consiste em utilizar cerca de 80% do quadrado da quantidade de partículas para a quantidade de iterações e cerca de 20% para a quantidade de partículas. Este cálculo é realizado caso a quantidade de partículas for menor que 50, já quando a quantidade de partícula é maior, o algoritmo realizará 1000 iterações e utilizará cerca de 20% dos 80% do quadrado da quantidade de partículas.

Já os valores utilizados para os coeficientes são:

- Coeficiente de confiança para a partícula Atual: 0,7298
- Coeficiente de confiança para a melhor partícula local: 1,49618
- Coeficiente de confiança para a melhor partícula global: 1,49618

Após a realização destes passos, pode-se realizar a execução da metaheurística de Enxame de partículas. Ela consiste em inicialmente realizar a inicialização da população, que é gerada utilizando o método de roleta. A escolha da população é realizada de forma a dar preferência aos vizinhos não visitados que possuem menores distâncias. E assim até que todas as trilhas estejam no vetor que contém os pontos. Com isso é verificado a distância que será percorrida durante a realização de uma atividade, caso este seja o percurso escolhido.

Com a população gerada, é realizada a primeira execução, calculando a distância total de trabalho e a distância de não trabalho. Porém antes é verificado se os pontos estão organizados de forma correta, uma vez que como cada faixa possui duas extremidades, necessita-se verificar se há uma correta relação entre os pontos ou se a distância caso haja inversão será diminuída.

Com a primeira execução realizada, é inicializada os vetores que contém os melhores indivíduos de cada partícula e o vetor que contém o melhor indivíduo das execuções e após realiza-se um loop

Este loop é realizado enquanto a quantidade de iterações não for atingida e inicialmente ele realiza a permutação das faixas, atualizando as melhores partículas caso seja necessário.

Com este passo realizado, é calculada a velocidade a partir da utilização da equação expressa em (3) e atualizada as partículas de acordo com a equação expressa em (4).

Porém, como a velocidade acaba gerando valores decimais e fora do intervalo, é realizada uma adequação na partícula transformando os valores em inteiros e colocando os valores fora do intervalo para dentro do intervalo.

Com isso é realizado a verificação em busca pontos repetidos além de verificar se a dupla de pontos da faixa está em sequência, realizando a permutação das partículas de forma aleatória. Esta permutação também ocorre na melhor partícula de cada indivíduo caso a permutação não encontre um valor melhor que o já encontrado pela partícula.

Ao ser realizado estes passos, é verificado a melhor partícula e caso não haja uma melhoria em 20 execuções, é chamada a metaheurística auxiliar a fim de se buscar uma otimização na melhor partícula até então encontrada. E caso se passe 50 execuções sem melhoria, é gerada uma nova população.

Com isso, retorna-se ao início do loop.

A execução da metaheurística ACO é realizada após os feromônios serem inicializados e os valores da primeira faixa são colocados em uma variável auxiliar a fim de serem colocados no início de cada formiga.

Com a faixa que a formiga deve sair, inserida no caminho, as demais são inseridas verificando a distância que ela percorrerá.

Após é verificada a melhor partícula da execução e realizada a permutação entre as faixas, verificando se houve melhoria.

Com isso realizado, é feito a evaporação dos feromônios, e colocando a formiga na faixa em que cada formiga encontrou o melhor caminho, retornando ao início do loop até que a quantidade de iterações seja realizada.

Com a finalização da metaheurística, é criado o gráfico de convergência da distância de não trabalho e o caminho gerado além de salvar os dados em um arquivo .xls. Além destes arquivos, quando todas as execuções são finalizadas, é gerado o Boxplot da distância total e da distância de não trabalho.

Todo esse passo a passo é mostrado no fluxograma da Figura 37 apresentado no item que descreve a Obtenção da Rota otimizada.

## 4.5 Testes e Validação

A efeito de validação foi realizada a comparação com a abordagem realizada por Bochtis e Vougioukas (2008), que propuseram um método para minimizar a distância percorrida nas manobras de cabeceiras e utilizaram três campos de

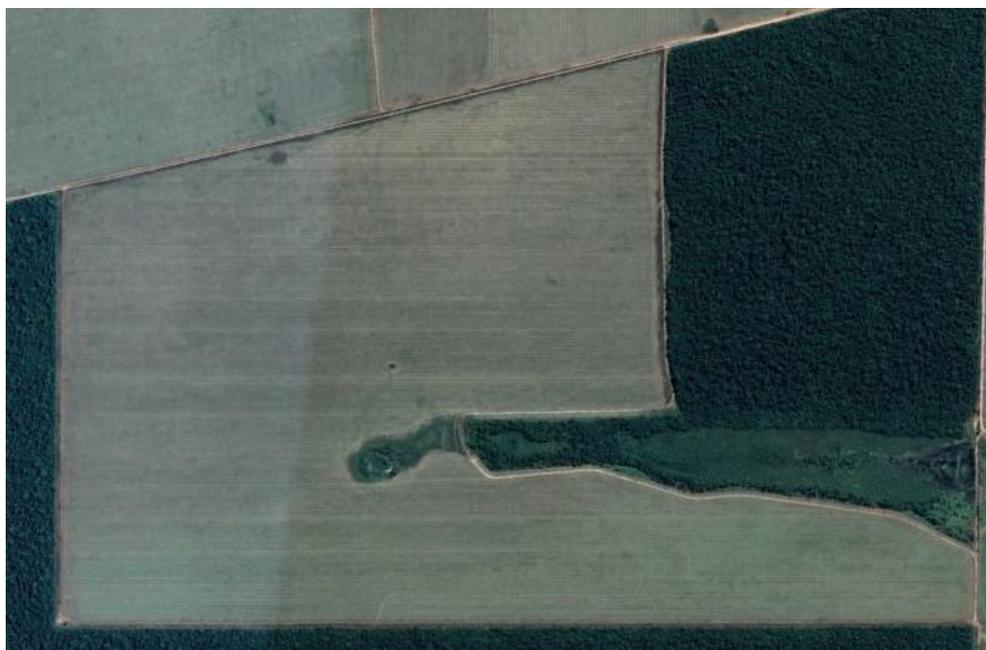
dimensões diferentes considerados pequenos. Os campos se localizam na Universidade Aristóteles de Salonica, norte da Grécia que pode ser visualizado na Figura 11. Estes campos possuem dimensões de 24x30m<sup>2</sup>, 30x40m<sup>2</sup> e 30x70m<sup>2</sup>.

Também foi realizada a comparação com o trabalho realizado por Spekken e Bruin (2012) cujo estudo objetivou a otimização das rotas com foco na manobra de cabeceiras e direção de trabalho e foi utilizada uma área localizada no Mato Grosso do Sul.

Após ser realizada a validação, comparando a abordagem proposta com as acima citadas, foram realizados testes com dois campos dedicados a agricultura, localizados no estado de Mato Grosso do Sul e foram escolhidas devido ao formato e ao tamanho do campo.

O campo denominado “Campo 1”, corresponde a um talhão dentro de uma fazenda e possui uma área de aproximadamente 155 hectares com o solo classificado como médio arenoso. Este talhão pode ser observado na Figura 38, retirada partir de imagens de satélite pelo aplicativo Google Earth Pro.

**Figura 38: Campo utilizado para testes que possui 155 hectares, sendo parte de uma fazenda localizada na região sul do estado de Mato Grosso do Sul**

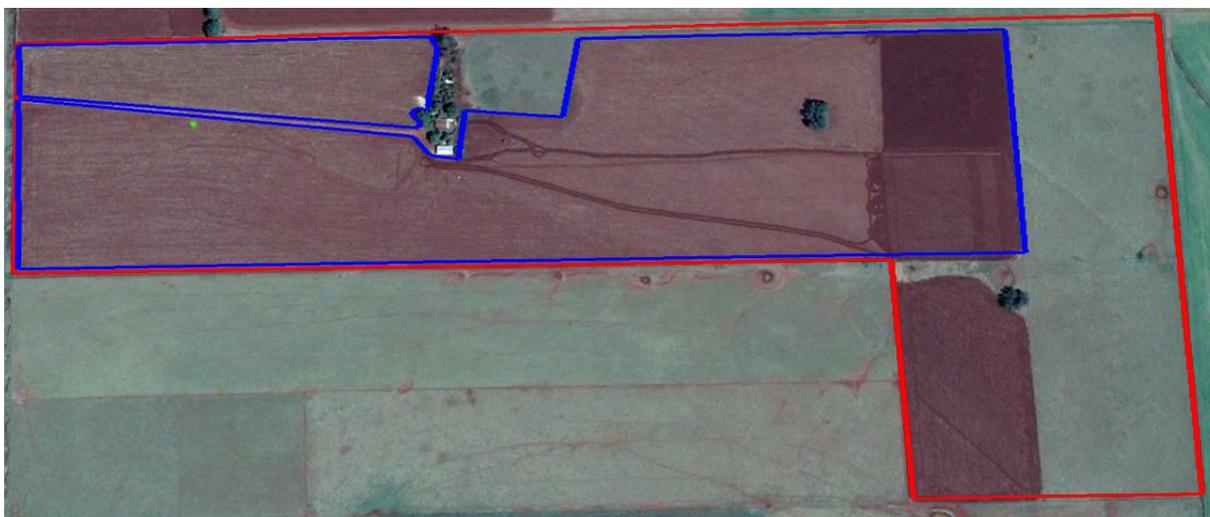


**Fonte: Google Earth Pro**

Já o campo denominado “Campo 2”, corresponde a um sitio com cerca de 36 hectares, com solo do tipo argiloso e é realizada integração lavoura pecuária, com isso foi utilizado apenas cerca de 24 hectares e foi dividido em duas partes devido a estrada que corta parte. Este sitio pode é mostrado na Figura 39, e pode se

observar a dimensão completa (36ha) na linha vermelha e a utilizada para cultivo agrícola (26ha).

**Figura 39: Sítio que possui 36ha localizado na região Sudoeste do estado de Mato Grosso do Sul.**



**Fonte: Google Earth Pro**

O agricultor que cultiva o campo 1 é denominado grande agricultor com base na Lei 8629 de 25 de fevereiro de 1993 que caracteriza o tamanho dos lotes agrícolas, enquanto o campo 2 é definido como pequeno agricultor.

## 4.6 Considerações Finais

O método proposto visa realizar o planejamento da trajetória de um implemento durante uma determinada atividade agrícola. Este problema definido como NP-Difícil, e é baseado no Problema de Roteamento de Veículos Capacitivo - CVRP que por sua vez é baseado no problema do Caixeiro-viajante.

Para isso, inicialmente se deve saber a direção de trabalho e as coordenadas das trilhas paralelas. A definição da direção de trabalho procura estabelecer a direção que faz com que o campo possua a menor quantidade de trilhas paralelas. Isso é realizado a partir da planilha desenvolvida no estudo realizado por Spekken (2012).

A otimização das rotas é realizada utilizando a metaheurística de Otimização por Enxame de Partículas, uma vez que por ser um problema de otimização combinatória NP-Difícil, mostra sua viabilidade. Ela foi implementada em sua forma

básica apenas com modificações para que a velocidade gere partículas com valores inteiros, visto que a população das partículas são as coordenadas das extremidades das trilhas.

A implementação da metaheurística foi realizada utilizando o MatLab que foi escolhida por ser uma linguagem de alto desempenho com foco na computação técnica, integrando a computação, visualização e programação.

O método foi validado utilizando como comparação os campos utilizados em dois estudos: um realizado por Bochtis um realizado por Spekken. Também foi realizado testes utilizando um campo côncavo com diversas bordas e um campo que foi dividido em duas áreas.

# Capítulo 5

## RESULTADOS

---

Para se verificar a validade do método proposto foram realizados diversos testes com campos com diversas dimensões. Os dados apresentados após a finalização dos testes são comparados com os resultados apontados por estudos anteriores de Bochtis e Vougioukas (2008).

Também foram realizados testes utilizando dois campos localizados no estado de Mato Grosso do Sul que possuem dimensões diferentes.

Em cada campo aqui exemplificado, foi realizada uma quantidade de iterações com a quantidade de partículas proporcional ao tamanho do campo. Porém alguns dados são iguais em todos os testes, que são quantidade de execuções (10 execuções) e os coeficientes de confiança:

- Coeficiente de confiança para a solução atual: 0,7298
- Coeficiente de confiança para a melhor solução da partícula: 1,4962
- Coeficiente de confiança para a melhor solução: 1,4962

Os resultados detalhados dos testes são apresentados a seguir, e após serem apresentados os resultados de todos os experimentos, é realizada a discussão dos resultados.

### **5.1 Testes com os Campos definidos em Bochtis e Vougioukas (2008)**

Os campos definidos em Bochtis e Vougioukas (2008), são campos que possuem dimensão denominadas pequenas: 24x30m<sup>2</sup>, 30x40m<sup>2</sup> e 30x70m<sup>2</sup>.

### 5.1.1 Campo 24x30m<sup>2</sup>

O Campo 24x30m<sup>2</sup> foi o primeiro campo utilizado para validação definido por Bochtis e Vougioukas (2008). Nele foi utilizado um implemento com uma largura de trabalho de 2,89m e raio de rotação de 3,5m. Para esse campo foram utilizadas três abordagens nos testes.

A primeira abordagem consistiu em verificar a distância caso a cobertura seja realizada de forma sequencial. Este teste foi realizado pelo operador e apontou uma distância de não trabalho de 174,14m.

A segunda abordagem foi realizada de forma a se evitar voltas  $\Omega$  utilizando a experiência do operador e encontrou uma distância de não trabalho de 132,35m.

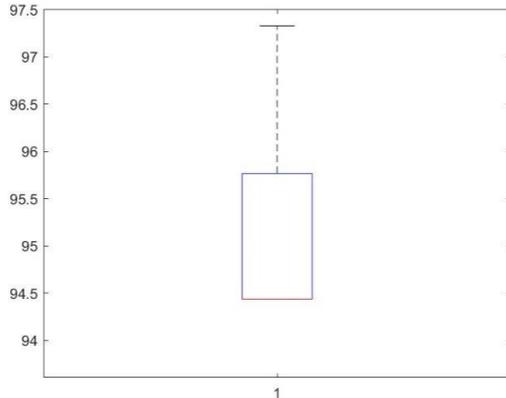
Já ao se utilizar a otimização proposta em Bochtis e Vougioukas (2008), na realização da cobertura do campo foi encontrada uma distância de não trabalho de 99,65m

No teste realizado utilizando a abordagem proposta, em cada execução foram realizadas 250 iterações utilizando 16 partículas e a menor distância de não trabalho aqui encontrada foi de 94,439m em 6 das 10 execuções e o maior valor de não trabalho foi de 97,329m em apenas 1 das 10 execuções. Os resultados de todas as execuções são apresentados na Tabela 2 que contém a distância total apresentada, a distância de não trabalho e o tempo de execução

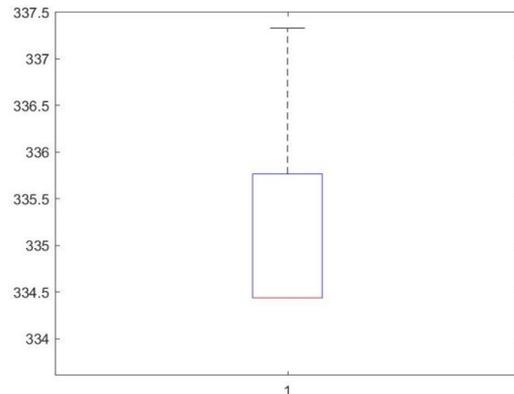
**Tabela 2: Resultados obtidos no teste com o campo de 24x30m<sup>2</sup> da proposta de Bochtis e Vougioukas (2008)**

Exec.	Dist. total (m)	Dist. de não trabalho (m)	Tempo de Execução (s)
01	337,329	97,329	53,017
02	334,439	94,439	100,986
03	335,767	95,767	77,98
04	335,767	95,767	85,34
05	334,439	94,439	73,761
06	335,767	95,767	84,077
07	334,439	94,439	71,516
08	334,439	94,439	76,075
09	334,439	94,439	78,445
10	334,439	94,439	48,124

A Tabela 2 mostra que os valores encontrados nas execuções, são menores que o valor encontrado em Bochtis e Vougioukas (2008), o que também pode ser visualizado na Figura 40 apresenta o boxplot das execuções em relação à distância de não trabalho. Já a Figura 41 apresenta o boxplot das execuções com a distância total percorrida.

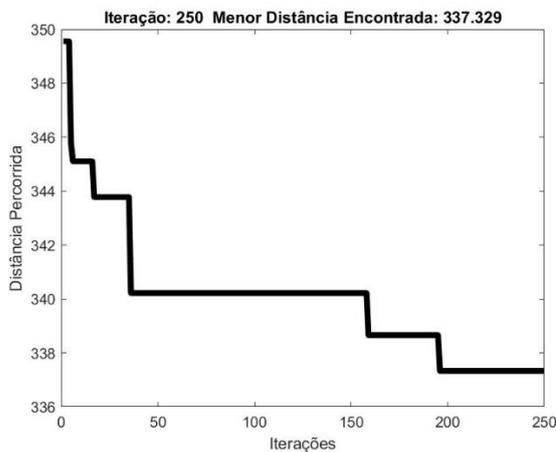


**Figura 40: Gráfico do Boxplot das execuções com a distância de não trabalho do campo com dimensões 24x30m**

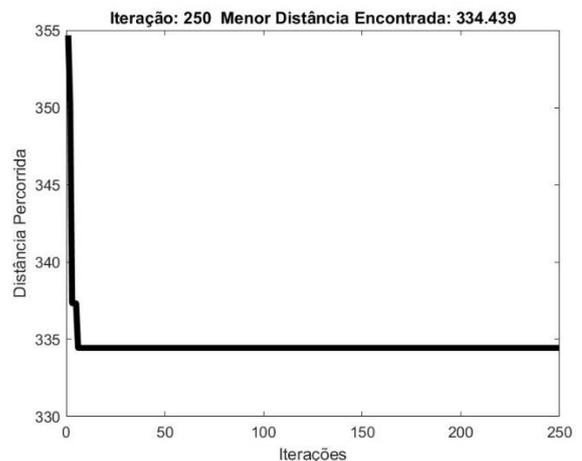


**Figura 41: Gráfico do Boxplot das execuções com a distância total do campo com dimensões 24x30m**

Também foi gerado um gráfico de convergência com a distância total em cada execução que é apresentado a seguir.



**Figura 42: Gráfico de convergência da 1ª Execução do teste com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



**Figura 43: Gráfico de convergência da 2ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**

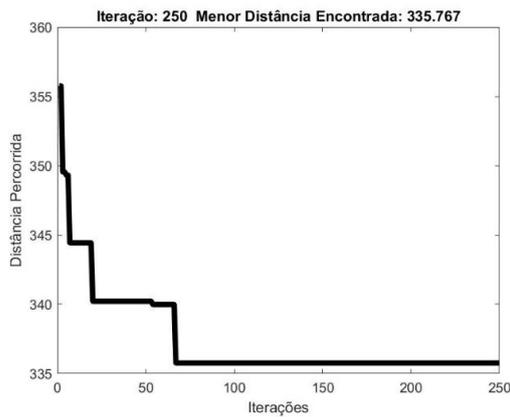


Figura 44: Gráfico de convergência da 3ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)

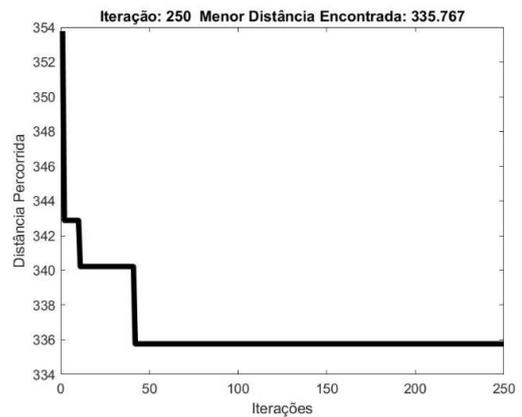


Figura 45: Gráfico de convergência da 4ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)

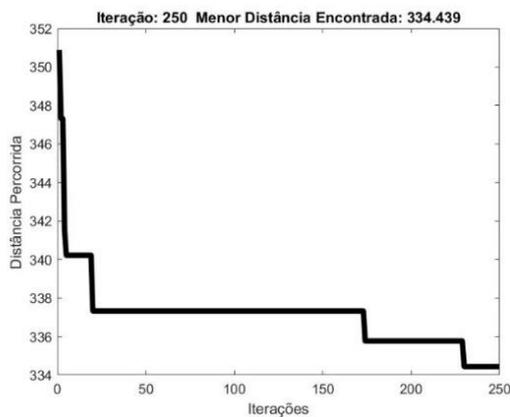


Figura 46: Gráfico de convergência da 5ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)

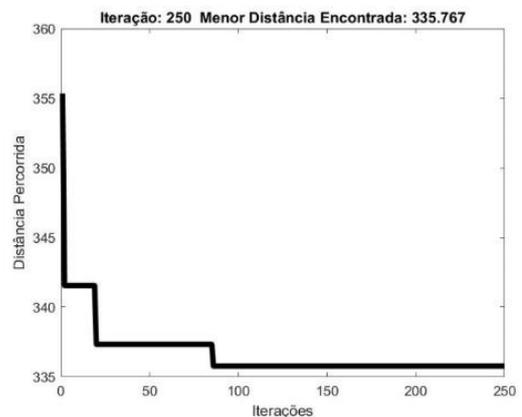


Figura 47: Gráfico de convergência da 6ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)

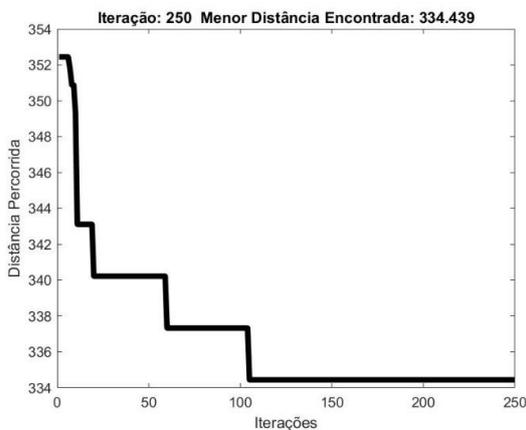


Figura 48: Gráfico de convergência da 7ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)

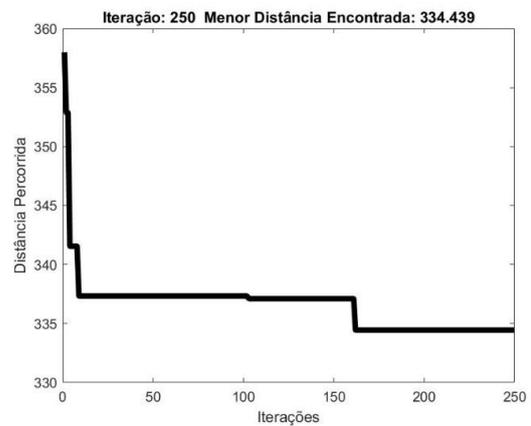
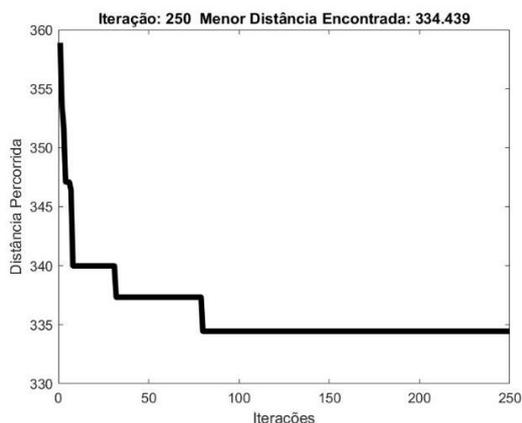
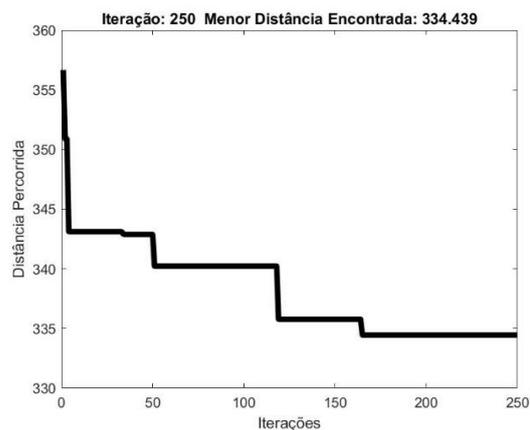


Figura 49: Gráfico de convergência da 8ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)



**Figura 50: Gráfico de convergência da 9ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



**Figura 51: Gráfico de convergência da 10ª Execução com o campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**

Os gráficos de convergência demonstram que o valor mínimo foi encontrado, na maioria dos casos antes de serem realizadas 200 iterações, exceto na 5ª execução que o valor mínimo encontrado foi obtido por volta da 230ª iteração.

### 5.1.2 Campo 30x40m<sup>2</sup>

Outro campo presente no trabalho realizado por Bochtis e Vougioukas (2008), possui uma dimensão de 30x40m<sup>2</sup> e foi utilizado um outro implemento em que o raio de rotação do também é de 3,5m, no entanto a largura de trabalho é de 2,5m. O teste foi realizado utilizando o método desenvolvido comparando-o com o percurso definido pelo operador. No caminho realizado quando é definido pelo operador foi encontrada uma distância total de não trabalho de 210,20m enquanto o caminho otimizado encontrou uma distância de 181,57m.

No teste realizado utilizando o método aqui proposto foram realizadas 350 iterações, utilizando 24 partículas, e a mínima distância de não trabalho encontrada foi de 148,527m, enquanto a maior foi de 160,602m. Os resultados de cada execução são apresentados na Tabela 3 com a distância total, distância de não trabalho e o tempo de execução.

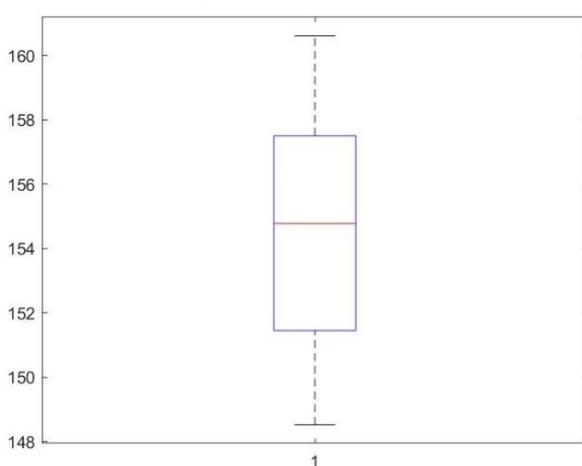
**Tabela 3: Resultados das execuções do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> do estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008)**

Exec.	Dist. Total (m)	Dist de não Trabalho (m)	Tempo de Execução (s)
01	640,602	160,602	243,388
02	631,451	151,451	227,696
03	631,027	151,027	321,626
04	636,451	156,451	218,907
05	633,551	153,551	231,837
06	635,602	155,602	237,614
07	633,951	153,951	340,843
08	628,527	148,527	407,53
09	637,501	157,501	353,394
10	638,102	158,102	214,554

Fonte: Os autores

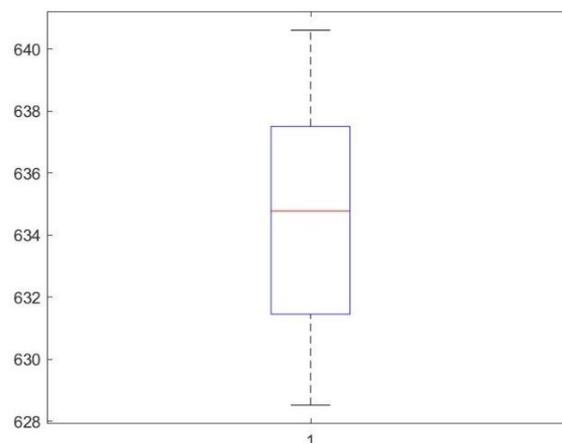
A Tabela 3, mostra que as distâncias encontradas são menores que as distâncias encontradas no estudo comparativo. O boxplot com os valores das distâncias de não trabalho é mostrada na Figura 52 enquanto os valores das distâncias totais são mostrados na Figura 53.

**Figura 52: Boxplot que mostra as distâncias de não trabalho do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

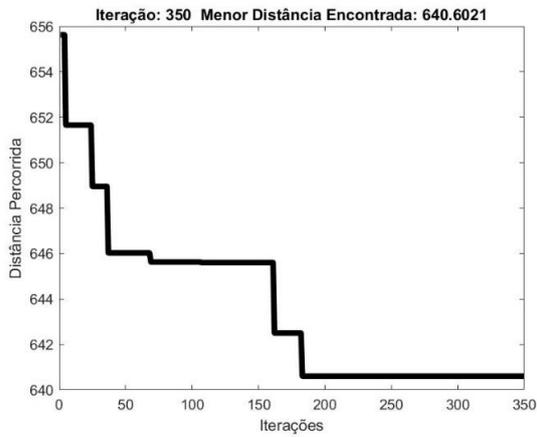
**Figura 53: Boxplot com os valores das distancias totais do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

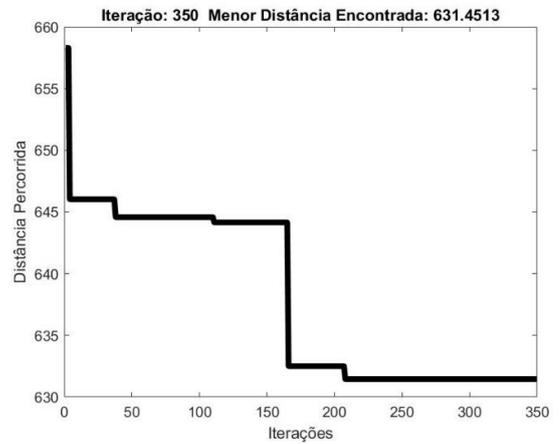
Já os gráficos de convergência de cada execução são apresentados a seguir

**Figura 54: Gráfico de convergência encontrado na 1ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



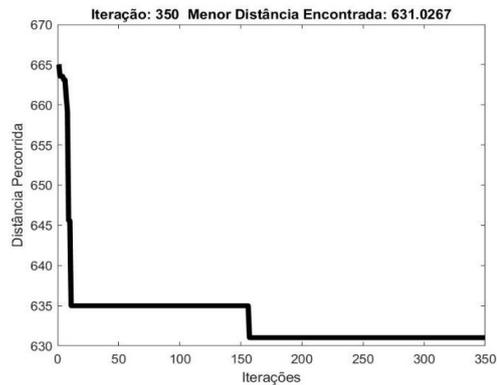
Fonte: Os autores

**Figura 55: Gráfico de convergência encontrado na 2ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



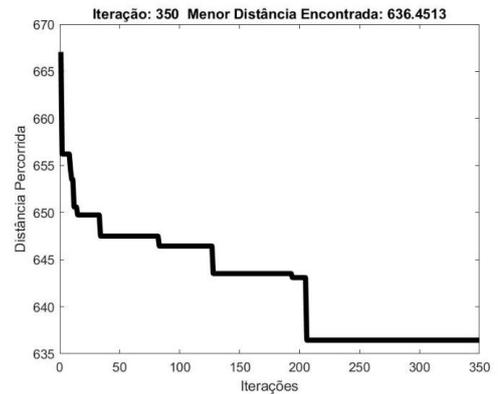
Fonte: Os autores

**Figura 56: Gráfico de convergência encontrado na 3ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



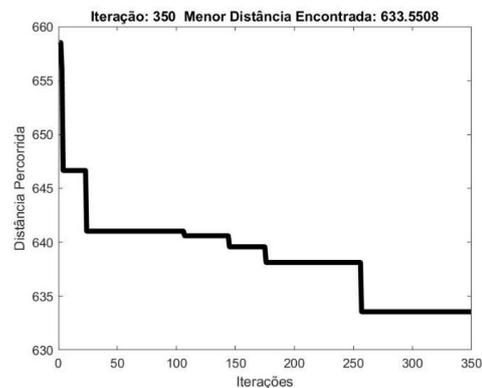
Fonte: Os autores

**Figura 57: Gráfico de convergência encontrado na 4ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



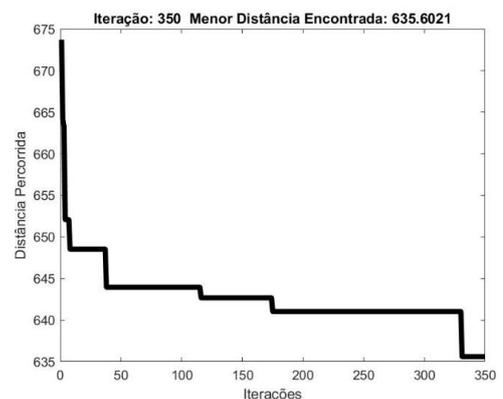
Fonte: Os autores

**Figura 58: Gráfico de convergência encontrado na 5ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



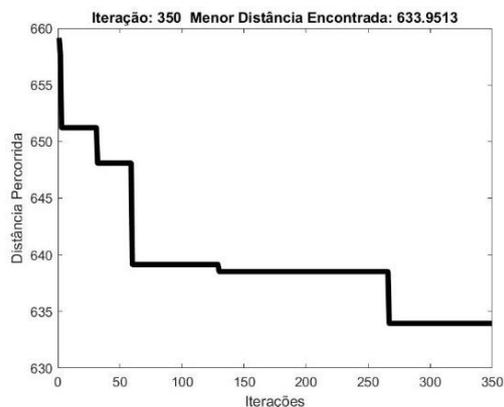
Fonte: Os autores

**Figura 59: Gráfico de convergência encontrado na 6ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



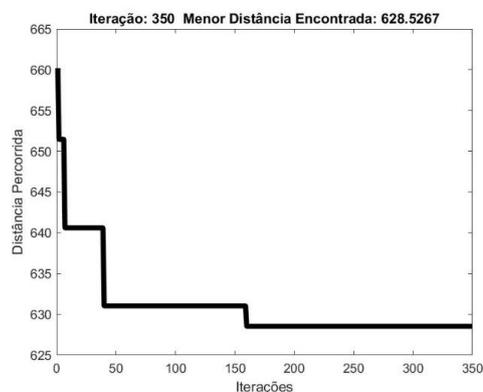
Fonte: Os autores

**Figura 60: Gráfico de convergência encontrado na 7ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



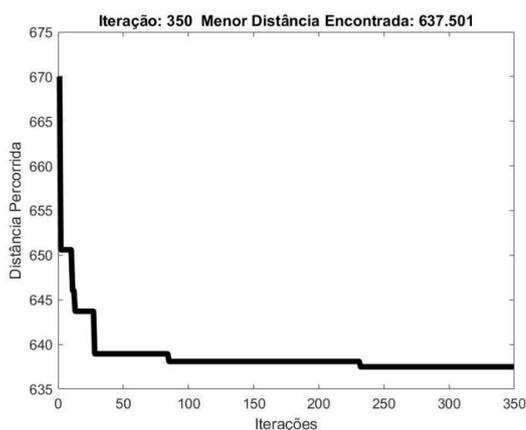
Fonte: Os autores

**Figura 61: Gráfico de convergência encontrado na 8ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



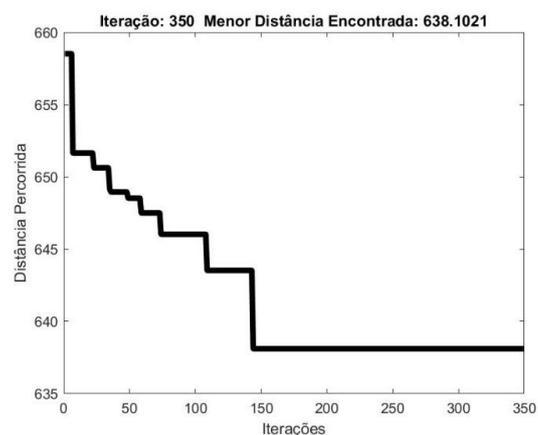
Fonte: Os autores

**Figura 62: Gráfico de convergência encontrado na 9ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

**Figura 63: Gráfico de convergência encontrado na 10ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

### 5.1.3 Campo 30x70m<sup>2</sup>

Outro campo utilizado possui dimensão 30x70m e assim como o campo que possui dimensão 30x40m foram utilizados os implementos utilizados foram os mesmos, ou seja, o raio de rotação é de 3,5m e a largura de trabalho de 2,5m. Os testes realizados compararam a abordagem de Bochtis e Vougioukas (2008), com o trajeto definido pelo operador. No teste em que o trajeto foi definido pelo operador, a distância encontrada foi de 242, enquanto a abordagem de Bochtis e Vougioukas (2008) encontrou uma distância de não trabalho de 176,57m.

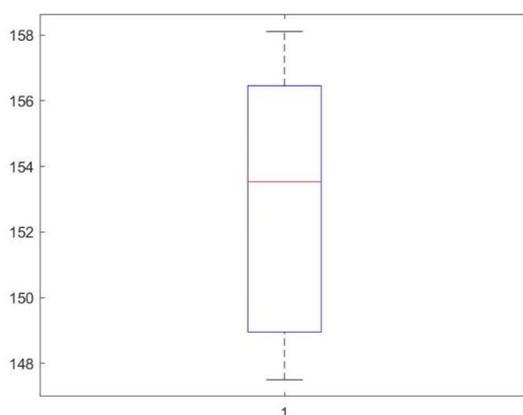
Já o método proposto neste estudo encontrou uma distância mínima de 147,501m enquanto a maior distância foi 158,102m, utilizando 24 partículas e executando 350 iterações em cada execução. Os resultados de cada execução são apresentados na Tabela 4 e além da distância de não trabalho, contém a distância total e o tempo de cada execução.

**Tabela 4: Resultados detalhados das execuções do teste com o campo com dimensões 30x70m<sup>2</sup> do estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2018)**

Exec	Dist. Total	Dist. Não Trabalho	Tempo de Exec.
01	993,527	153,527	166,829
02	997,076	157,076	257,094
03	993,527	153,527	214,056
04	993,527	153,527	165,624
05	987,501	147,501	275,744
06	998,102	158,102	317,34
07	996,451	156,451	275,185
08	993,527	153,527	347,12
09	988,951	148,951	161,425
10	987,501	147,501	230,349

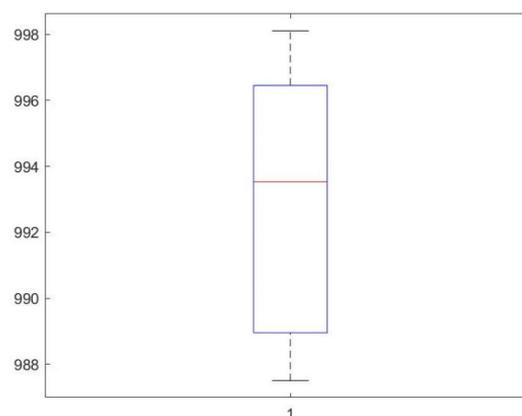
A Tabela 4, mostra que as distâncias encontradas são menores que as distâncias encontradas no estudo comparativo. O boxplot com os valores das distâncias de não trabalho é mostrado na Figura 64 enquanto os valores das distâncias totais são mostrados na Figura 65.

**Figura 64: Boxplot com os valores das distâncias de não trabalho do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

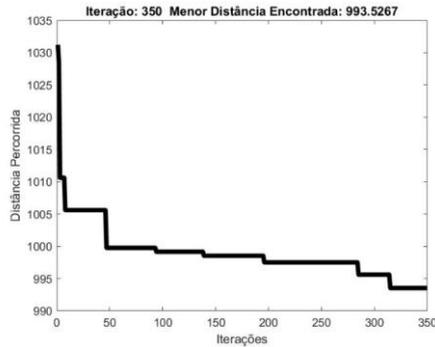
**Figura 65: Boxplot com os valores totais das execuções do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

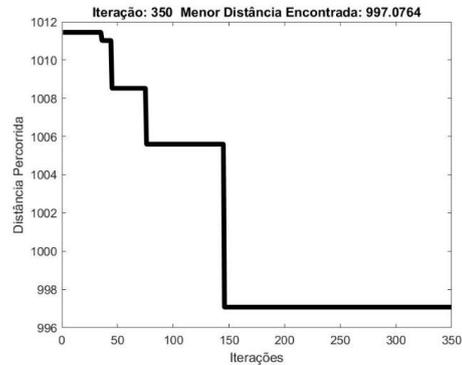
Já os gráficos de convergência de cada execução são apresentados a seguir:

**Figura 66: Gráfico de convergência da 1ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



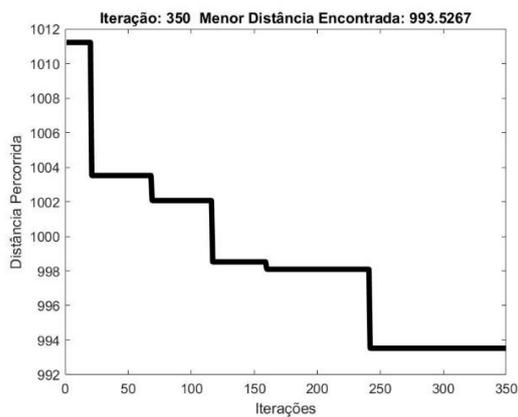
Fonte: Os autores

**Figura 67: Gráfico de convergência da 2ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



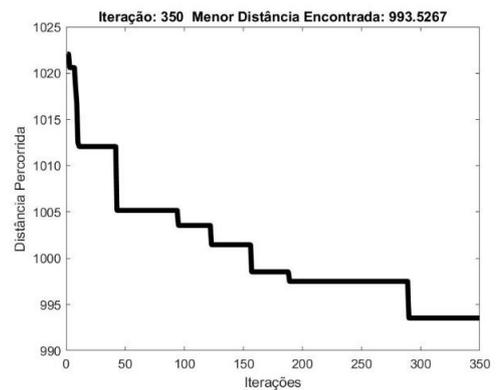
Fonte: Os autores

**Figura 68: Gráfico de convergência da 3ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



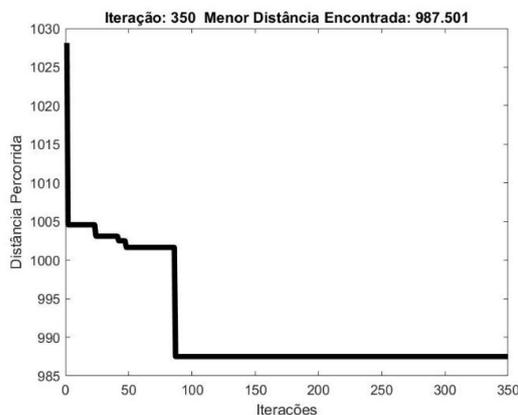
Fonte: Os autores

**Figura 69: Gráfico de convergência da 4ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



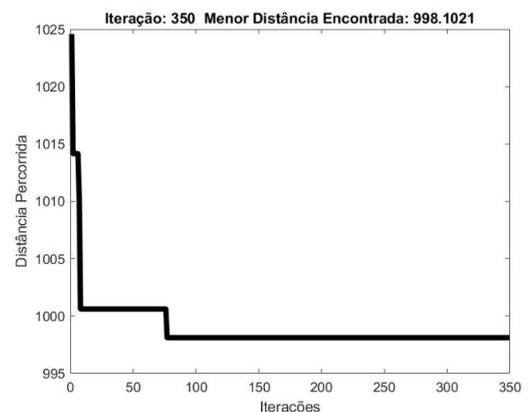
Fonte: Os autores

**Figura 70: Gráfico de convergência da 5ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



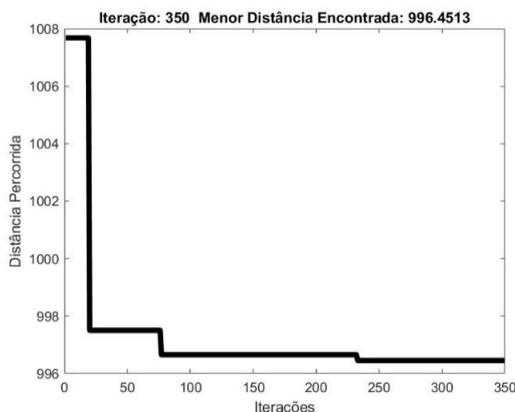
Fonte: Os autores

**Figura 71: Gráfico de convergência da 6ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



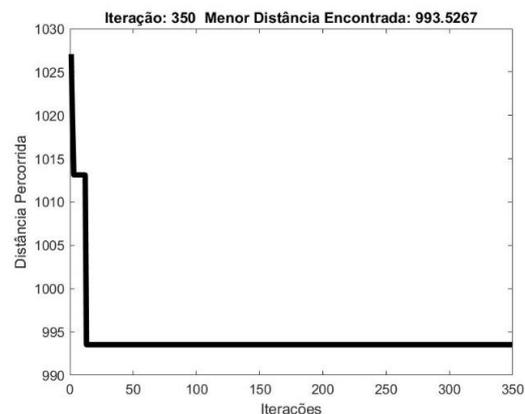
Fonte: Os autores

**Figura 72: Gráfico de convergência da 7ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



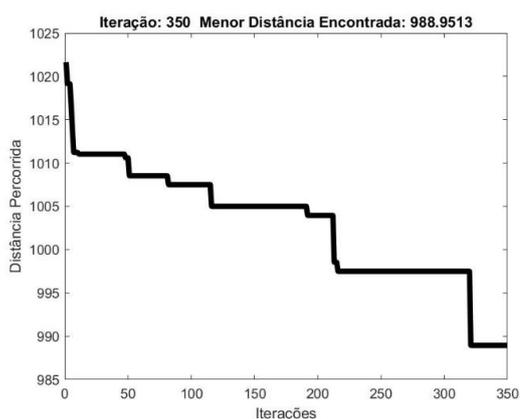
Fonte: Os autores

**Figura 73: Gráfico de convergência da 8ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



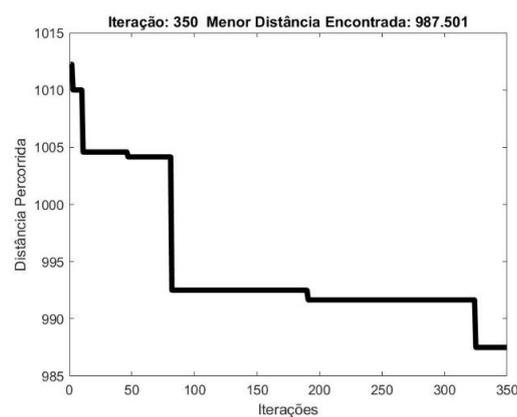
Fonte: Os autores

**Figura 74: Gráfico de convergência da 9ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

**Figura 75: Gráfico de convergência da 10ª execução do campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> de Bochtis e Vougioukas (2008)**



Fonte: Os autores

## 5.2 Talhão de 155 hectares

O primeiro teste visou a utilização do método em um campo com 155 hectares localizado na região sul do estado de Mato Grosso do Sul, que utiliza implementos considerados modernos e que utilizam rastreamento GPS. Os implementos utilizados durante os testes são tratores da marca John Deere modelo 7715 e 7210J atrelados a plantadeiras marca Planti Center Big Farm PCA 21 G-4.

Durante os testes foi utilizado um raio de rotação de 22m e largura de trabalho de 20m. A execução utilizou 30 partículas e realizou-se 1000 iterações e os resultados encontrados foram iguais a 83.804,7531m em todas as execuções,

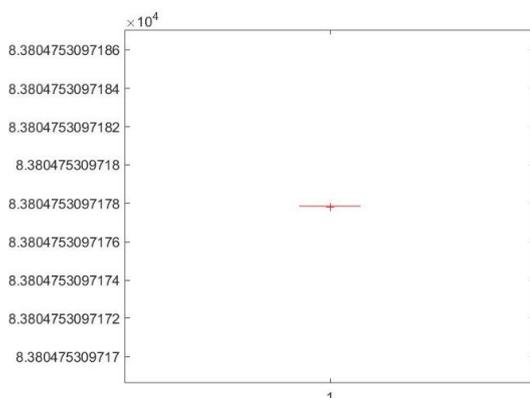
embora os trajetos encontrados sejam diferentes e gerou uma distância de não trabalho de 9774,2304m. A Tabela 5 aponta além das distâncias totais, a distância de não trabalho e o tempo de execução.

**Tabela 5: Resultados obtidos no teste realizado utilizando o campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul com 155 ha**

Exec.	Dist. total (m)	Dist. de não Trabalho (m)	Tempo de Exec (s)
01	83804,7531	9774,2305	17051,9907
02	83804,7531	9774,2305	12291,9942
03	83804,7531	9774,2305	14059,2369
04	83804,7531	9774,2305	14387,6609
05	83804,7531	9774,2305	13595,5884
06	83804,7531	9774,2305	13277,0266
07	83804,7531	9774,2305	13921,9949
08	83804,7531	9774,2305	15204,6921
09	83804,7531	9774,2305	14026,6288
10	83804,7531	9774,2305	13593,0879

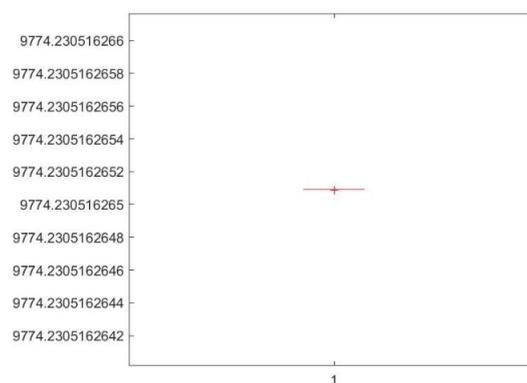
Os boxplots apresentados na Figura 76 e na Figura 77 apresentam o resultado com a distância total e a distância de não trabalho apresentadas durante a execução.

**Figura 76: Boxplot da distância total encontrada nos testes do campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



Fonte: Os autores

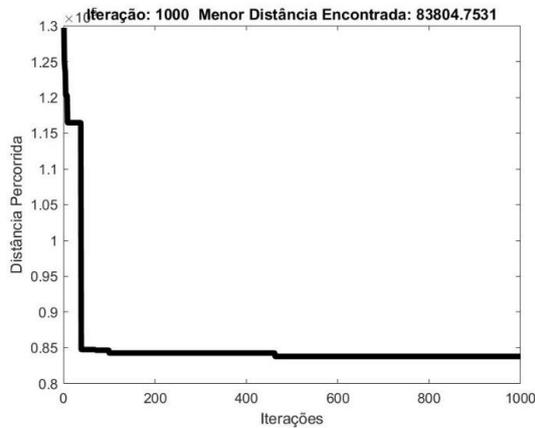
**Figura 77: Boxplot da distância de não trabalho encontrada nos testes do campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



Fonte: Os autores

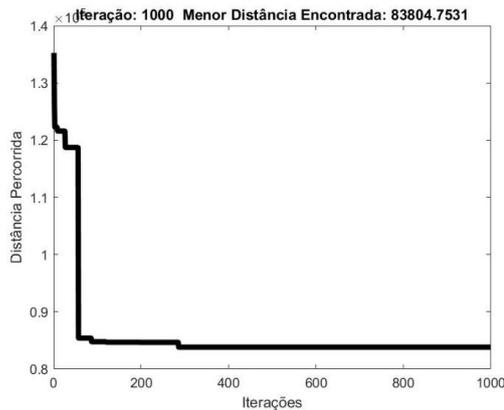
Estes valores foram encontrados nas execuções que são observadas nos gráficos de convergência.

**Figura 78: Gráfico de Convergência da 1ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



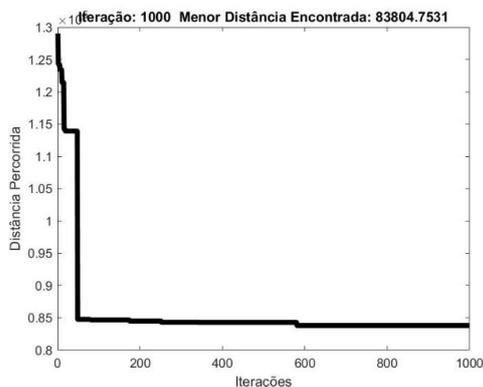
Fonte: Os autores

**Figura 80: Gráfico de Convergência da 3ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



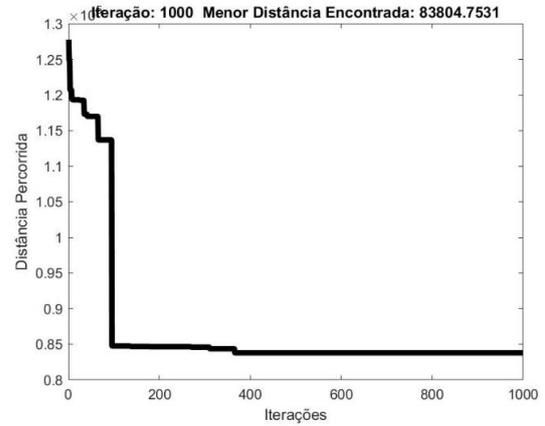
Fonte: Os autores

**Figura 82: Gráfico de Convergência da 5ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



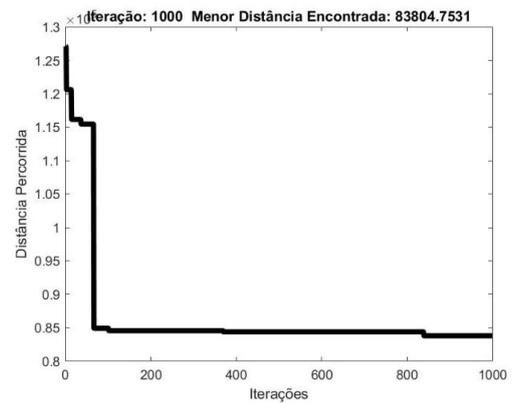
Fonte: Os autores

**Figura 79: Gráfico de Convergência da 2ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



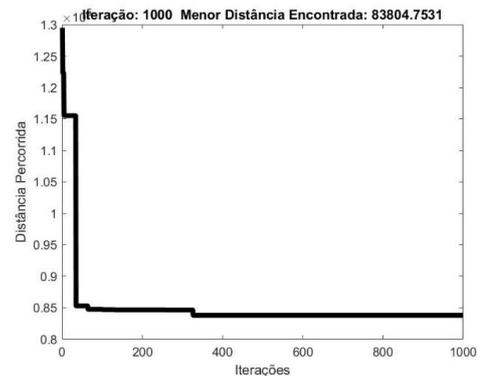
Fonte: Os autores

**Figura 81: Gráfico de Convergência da 4ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



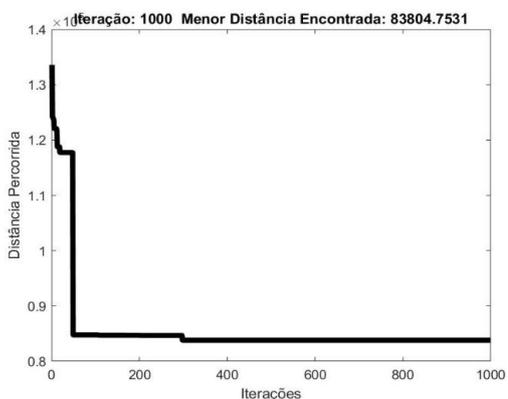
Fonte: Os autores

**Figura 83: Gráfico de Convergência da 6ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



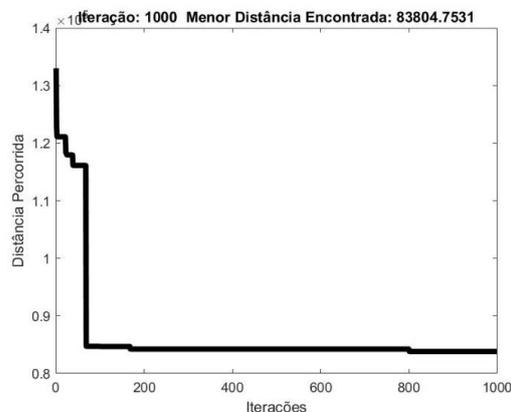
Fonte: Os autores

**Figura 84: Gráfico de Convergência da 7ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



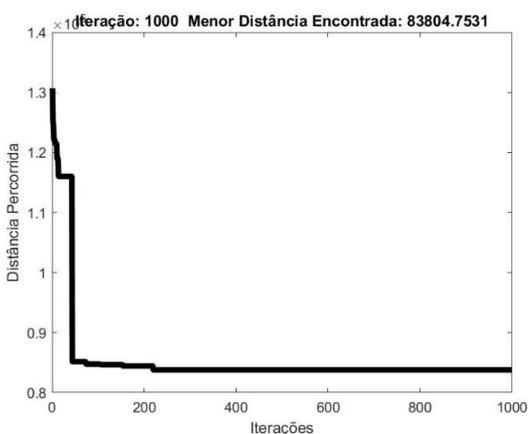
Fonte: Os autores

**Figura 85: Gráfico de Convergência da 8ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



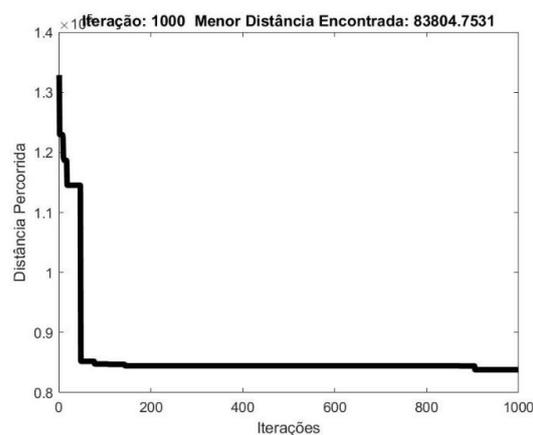
Fonte: Os autores

**Figura 86: Gráfico de Convergência da 9ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



Fonte: Os autores

**Figura 87: Gráfico de Convergência da 10ª execução do teste realizado no campo localizado no estado de Mato Grosso do Sul que possui uma área de 155ha**



Fonte: Os autores

### 5.3 Sitio com área de 36 hectares

O outro teste realizado neste estudo, utiliza o campo cultivado por um pequeno agricultor que possui uma área de 36 hectares, e o proprietário realiza o cultivo de lavoura em cerca de 25 hectares, dividindo em dois talhões conforme é mostrado na Figura 88.

**Figura 88: Parte do Sítio Localizado no Estado de Mato Grosso do Sul que é dividido em dois talhões para o cultivo**



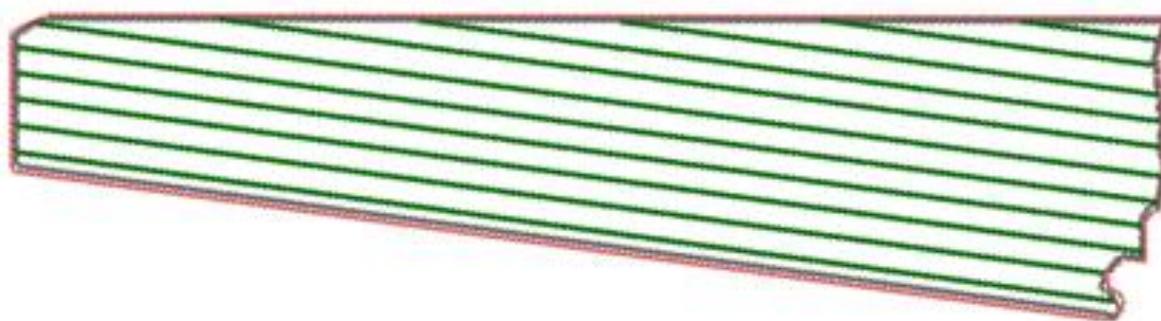
Fonte: Google Earth Pro

A atividade agrícola aqui realizada utiliza um implemento em que o raio de rotação é de 4,42m e largura de trabalho de 3,6m.

### 5.3.1 Talhão 1

O talhão aqui definido como 1 possui uma área de aproximadamente 3,7 hectares e a direção de trabalho é exemplificada na Figura 89, que mostra uma quantidade inferior da quantidade de faixas que o campo foi dividido.

**Figura 89: Delimitação da área do talhão 1 com a exemplificação da direção de trabalho**



Fonte: Os autores

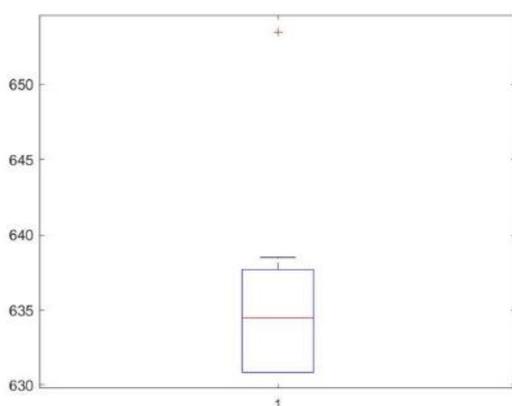
Durante os testes, foi demonstrado que na utilização da angulação definida no arquivo .xls é de  $58,49^\circ$  e possui 30 faixas de trabalho. Os testes realizados utilizaram 1000 iterações com 30 partículas e o menor valor encontrado foi de 630,849m enquanto o maior valor foi 653,499m. A seguir na Tabela 6 é mostrado os valores encontrados em cada execução com a distância total, a distância de não trabalho e o tempo de cada execução.

**Tabela 6: Resultados dos testes realizados no talhão menor com área de aproximadamente 3,7ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul**

Exec.	Dist. total (m)	Dist. de não Trabalho (m)	Tempo de Exec (s)
01	10436,67	637,692	1910,522
02	10433,463	634,485	1766,324
03	10429,827	630,849	1906,478
04	10433,463	634,485	1805,357
05	10429,827	630,849	1833,267
06	10429,827	630,849	1751,777
07	10433,463	634,485	1711,49
08	10452,477	653,499	1692,636
09	10429,827	630,849	1853,001
10	10437,46	638,482	1804,313

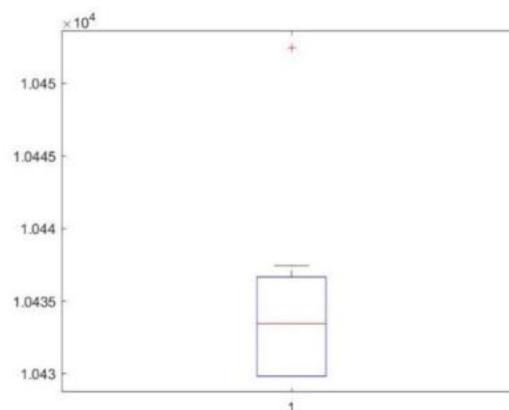
A Tabela 6 mostra que as distâncias encontradas são menores que as distâncias encontradas no estudo comparativo. O boxplot com os valores das distâncias de não trabalho é mostrado na Figura 90 enquanto os valores das distâncias totais são mostrados na Figura 91.

**Figura 90: Boxplot com os valores das distâncias de não trabalho encontrado nos testes realizados no sitio localizado no estado de Mato Grosso do Sul na parte que possui cerca de aproximadamente 3,7ha**



Fonte: Os autores

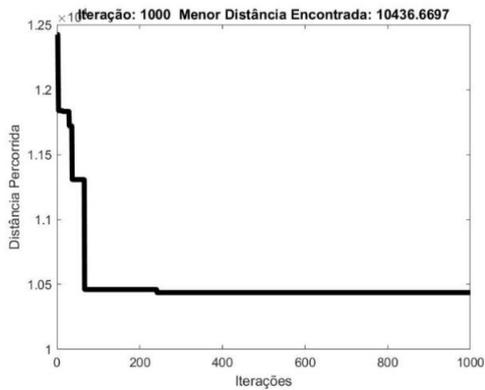
**Figura 91: Boxplot com os valores totais das execuções encontrados nos testes realizados na área que possui cerca de 3,7ha do sitio localizado no estado de Mato Grosso do Sul**



Fonte: Os autores

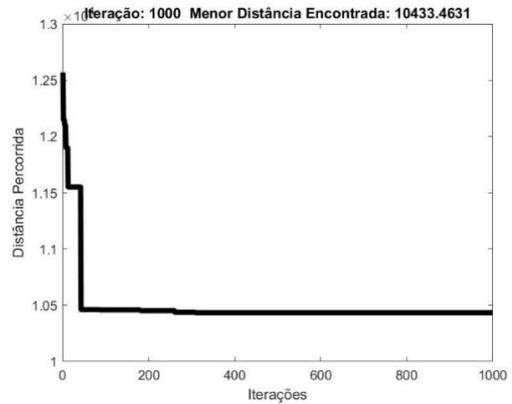
Já os gráficos de convergência de cada execução são apresentados a seguir:

**Figura 92:** Gráfico de convergência da 1ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



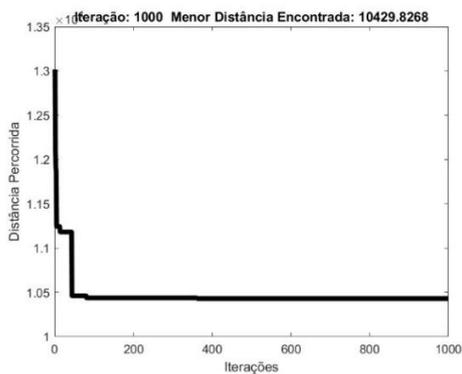
Fonte: Os autores

**Figura 93:** Gráfico de convergência da 2ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



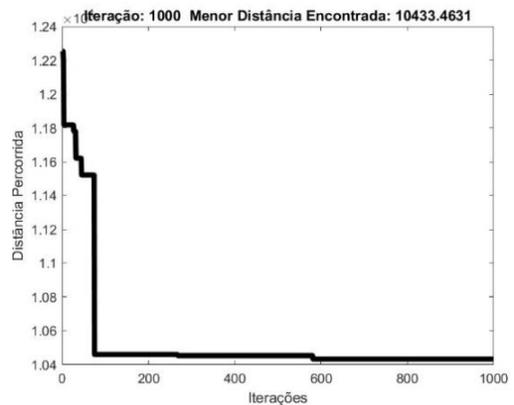
Fonte: Os autores

**Figura 94:** Gráfico de convergência da 3ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



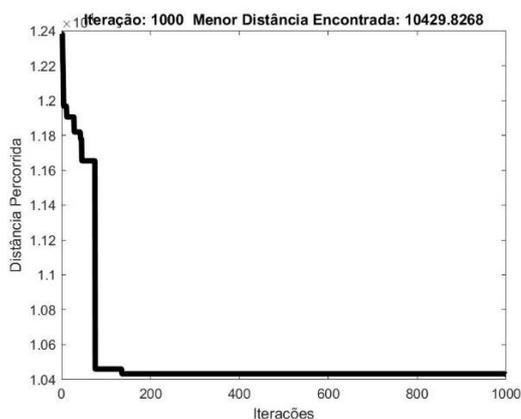
Fonte: Os autores

**Figura 95:** Gráfico de convergência da 4ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



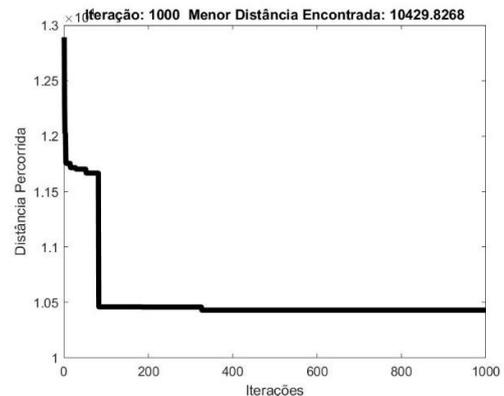
Fonte: Os autores

**Figura 96:** Gráfico de convergência da 5ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



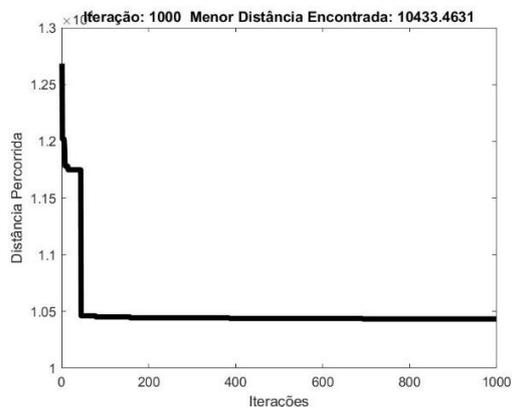
Fonte: Os autores

**Figura 97:** Gráfico de convergência da 6ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



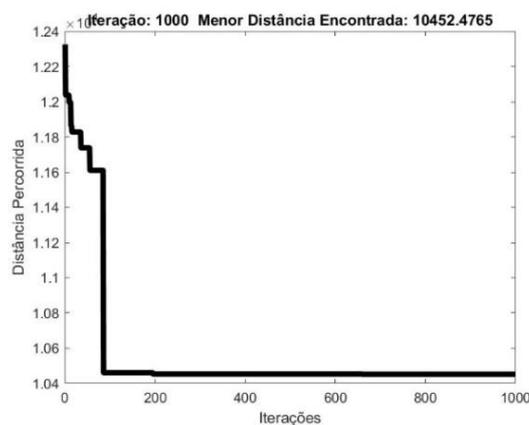
Fonte: Os autores

**Figura 98:** Gráfico de convergência da 7ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



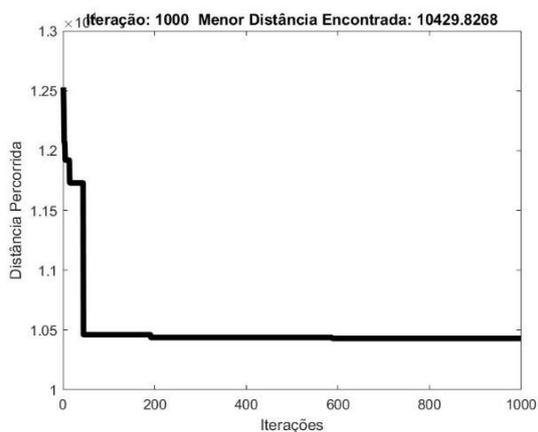
Fonte: Os autores

**Figura 99:** Gráfico de convergência da 8ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



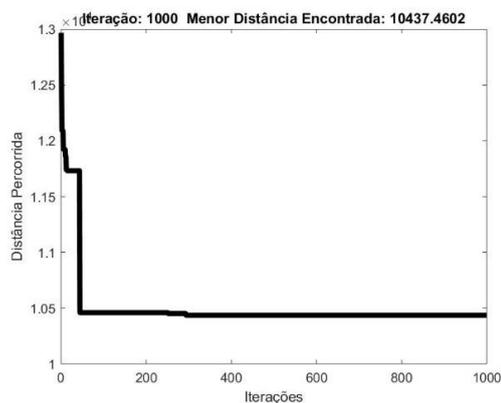
Fonte: Os autores

**Figura 100:** Gráfico de convergência da 9ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS



Fonte: Os autores

**Figura 101:** Gráfico de convergência da 10ª execução do campo que possui cerca de 3,7ha que corresponde a parte do sitio de 36ha localizado no MS

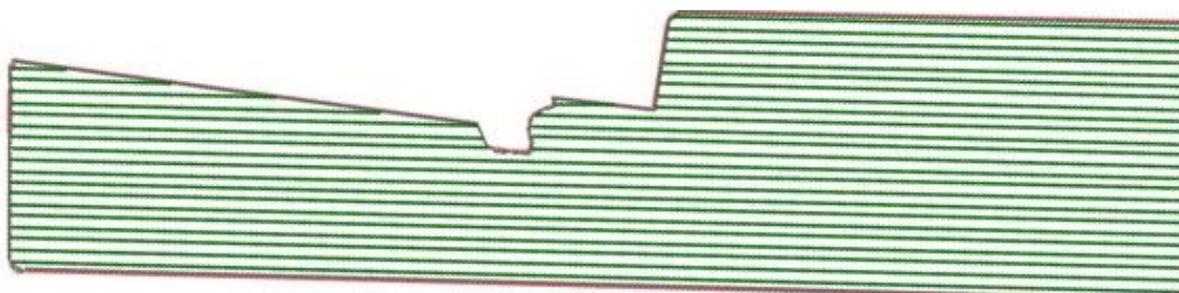


Fonte: Os autores

### 5.3.2 Talhão 2

O segundo talhão do campo é possui uma área de aproximadamente 23 hectares e a direção de trabalho utilizada é exemplificada na Figura 102, mostrando uma quantidade menor de faixas do que as que o campo possui.

**Figura 102: Talhão maior que possui cerca de 23ha que faz parte do sitio de 36ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul**



**Fonte: Os autores**

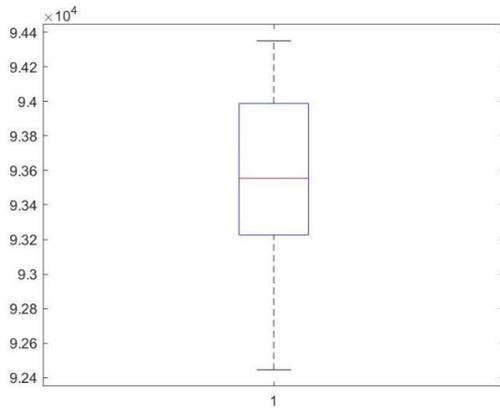
A angulação utilizada foi de  $64,59^\circ$ , possuindo um total de 91 faixas. Os testes realizados utilizaram 1000 iterações e 30 partículas, encontrando a menor distância total de 92445,6125m enquanto a maior foi de 94349,9913m. O detalhamento dos resultados de cada execução é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7: Resultados encontrados durante os testes realizados na área que possui cerca de 23ha, parte do sitio de 36ha localizado no estado de Mato Grosso do Sul**

Execução	Dist. total	Dist. de não trabalho	Tempo de Exec.
01	92979,7994	37454,1040	40505,7564
02	93226,3334	37700,6380	35638,7972
03	93483,5608	37957,8654	36473,6472
04	92445,6125	36919,9171	35904,1864
05	94349,9913	38824,2958	40299,5263
06	94078,948	38553,2526	32389,0128
07	93987,5271	38461,8317	35353,8401
08	93590,0687	38064,3733	40656,4904
09	93590,4002	38064,7047	35886,7286
10	93517,9398	37992,2443	39506,2055

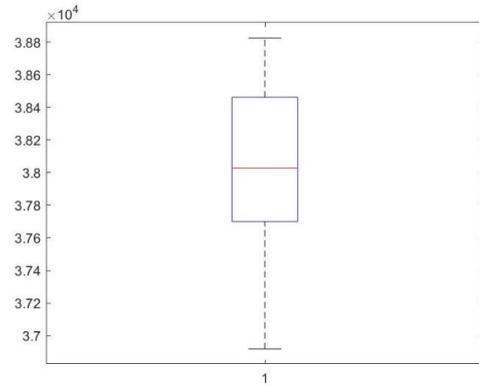
A Tabela 7 mostra além da distância total percorrida, a distância total de não trabalho e o tempo de execução de cada execução. Além da tabela, a seguir é mostrado o boxplot da distância total e da distância de não trabalho. Além do boxplot, apresenta-se o gráfico de convergência de cada execução.

**Figura 103: Boxplot da distância total encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



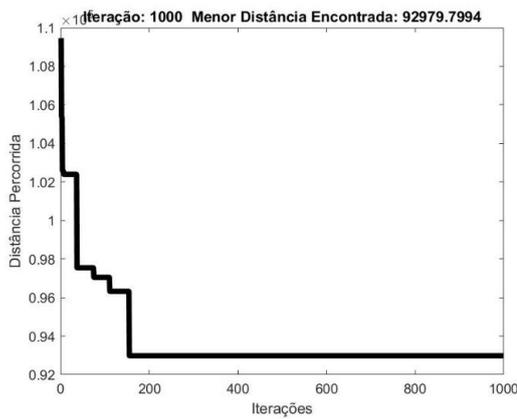
Fonte: Os autores

**Figura 104: Boxplot da distância de não trabalho encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



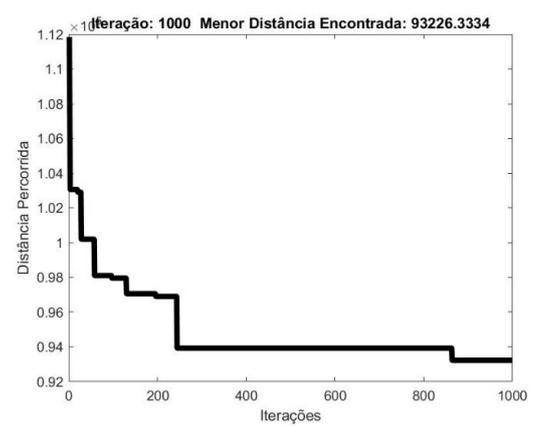
Fonte: Os autores

**Figura 105: Gráfico de Convergência da 1ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



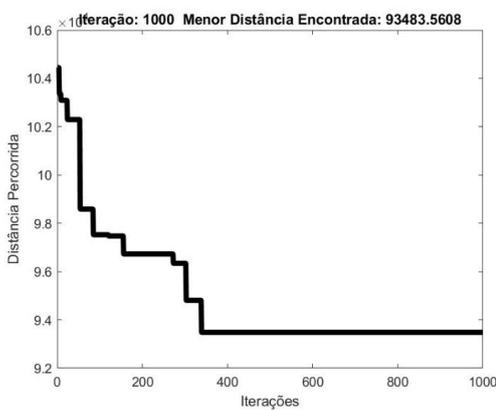
Fonte: Os autores

**Figura 106: Gráfico de Convergência da 2ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



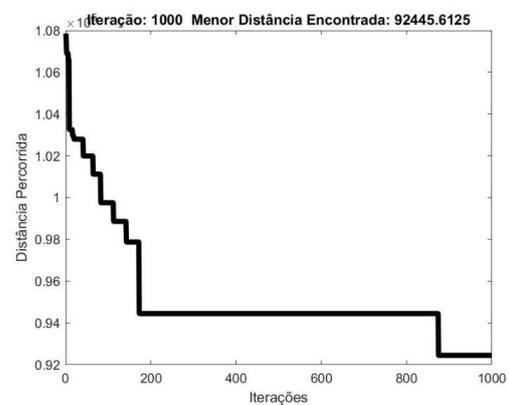
Fonte: Os autores

**Figura 107: Gráfico de Convergência da 3ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



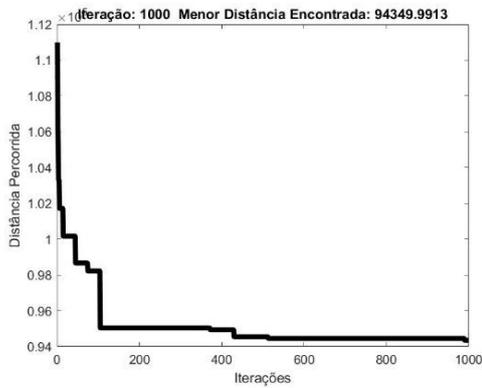
Fonte: Os autores

**Figura 108: Gráfico de Convergência da 4ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha**



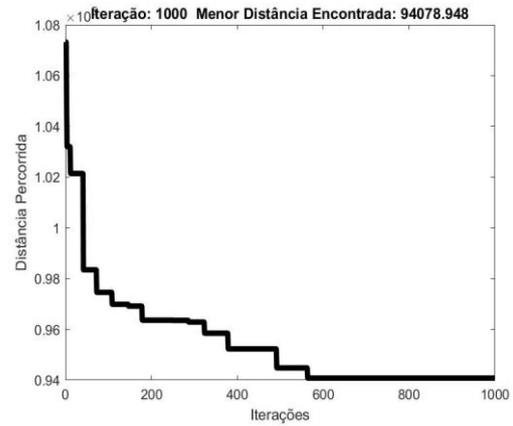
Fonte: Os autores

**Figura 109:** Gráfico de Convergência da 5ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



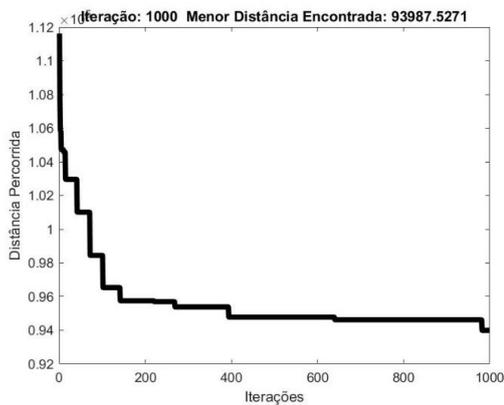
Fonte: Os autores

**Figura 110:** Gráfico de Convergência da 6ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



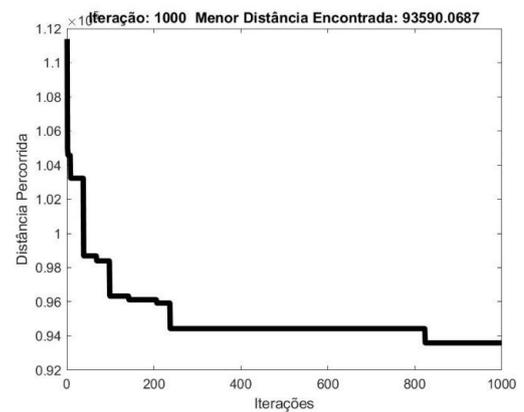
Fonte: Os autores

**Figura 111:** Gráfico de Convergência da 7ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



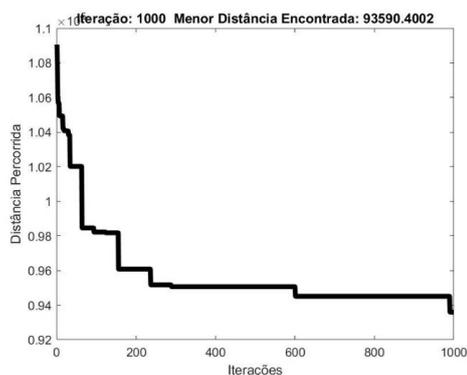
Fonte: Os autores

**Figura 112:** Gráfico de Convergência da 8ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



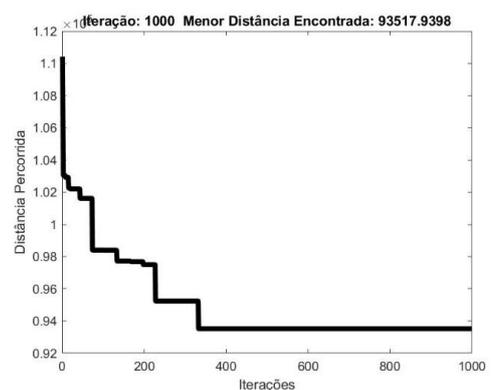
Fonte: Os autores

**Figura 113:** Gráfico de Convergência da 9ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



Fonte: Os autores

**Figura 114:** Gráfico de Convergência da 10ª execução encontrado durante os testes realizados no campo com 23ha parte do sitio de 36ha



Fonte: Os autores

## 5.4 Considerações Finais

Uma das maneiras encontradas por diversos pesquisadores para se otimizar os trajetos em campos agrícola, é a utilização de metaheurísticas, conforme se verifica nos trabalhos apontados na Revisão Bibliográfica.

Utilizando como base experimentos anteriores, este estudo realizou comparativos com áreas já testadas por outros autores, e mostrou que os resultados ao se utilizar esta abordagem foram melhorados ao se comparar com a abordagem proposta por Bochtis e Vougioukas (2008), uma vez que os resultados lá apresentados em relação a distância de não trabalho para o Campo com dimensão 24x30m<sup>2</sup> foi de 99,65m enquanto a abordagem aqui proposta mostrou um valor de 94,439m em 6 execuções e apenas uma execução apresentou o valor de 97,329m, o que representa uma redução de cerca de 5,23% em relação ao menor valor encontrado. Já o campo com dimensão 30x40m<sup>2</sup> a menor distância apresentada foi de 181,57m e a abordagem aqui descrita mostrou uma distância mínima de 148,527m e máxima de 160,60m, representando uma redução em relação a menor distância de 18,2% e o campo 30x70m<sup>2</sup> apresentou uma distância de 176,57m e na abordagem aqui descrita a maior distância encontrada foi de 158,102m e a menor de 147,501m, representando uma redução de cerca de 16,5%

Esta redução na distância, evidencia a economia de combustível uma vez que ela está diretamente ligada a distância percorrida. Também demonstra a diminuição da compactação do solo, uma vez que como o implemento percorreu uma distância menor, o solo foi menos pressionado e realizou menos perturbação tanto horizontal quanto vertical.

A Tabela 8 mostra uma comparação entre a abordagem apresentada e as distâncias apontadas no estudo de Bochtis e Vougioukas (2008)

**Tabela 8: Comparação dos Resultados encontrados pela abordagem apresentadas nesse método com a abordagem apresentada no estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008)**

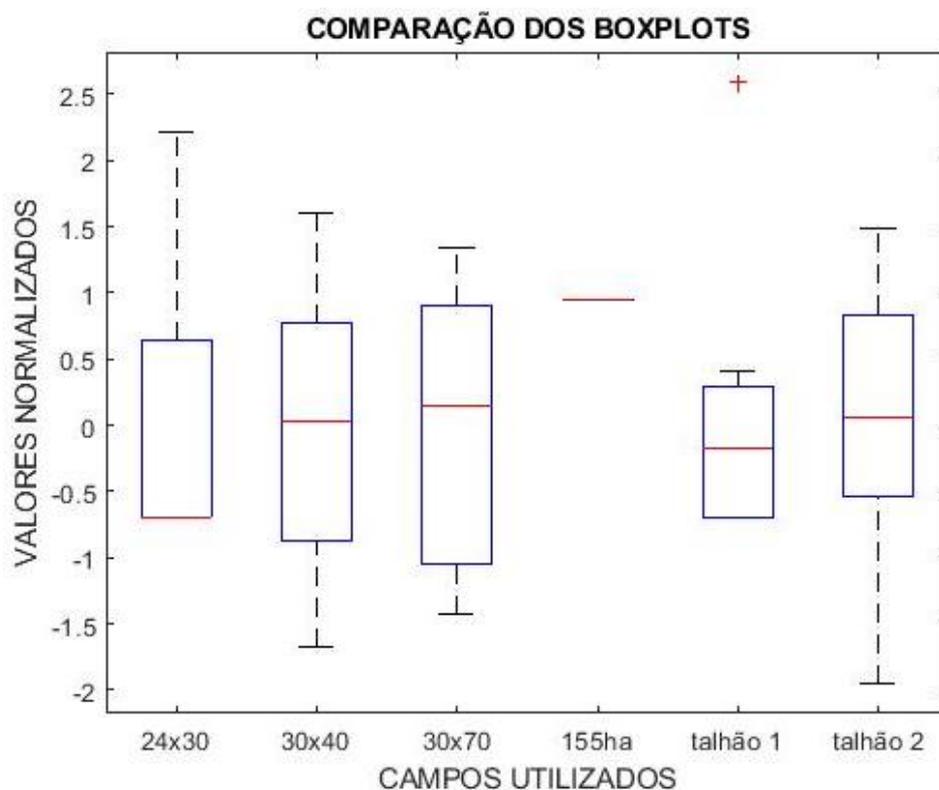
Campo	Método apresentado		Método de Bochtis e Vougioukas	% de Redução	
	Maior	Menor		Maior	Menor
24x30	97,329m	94,439m	99,65m	2,33%	5,23%
30x40	160,602m	148,527m	181,57m	11,54%	18,2%
30x70	158,102m	147,501m	176,57m	10,45%	16,5%

Os outros testes buscaram realizar a viabilidade de utilização do método apresentado, uma vez que as áreas experimentais aqui utilizadas possuem diferentes especificações: enquanto a área que possui a maior dimensão é cultivada utilizando equipamentos modernos, com piloto automático, sistema de localização, computador de bordo, dentre outros. Ao se aplicar o método apresentado, foi encontrada em todas as execuções uma distância de não trabalho de 9774,2305m. Porém devido a época da realização do experimento, não houve a possibilidade de se ter dados para realizar a comparação.

O sitio com aproximadamente 36ha que devido a estrada foi dividido em dois talhões é cultivada sem a utilização de nenhum equipamento tecnológico. Ele apresentou um valor mínimo de 630,849m e máxima de 653,499m no campo menor, denominado talhão 1, o que mostra uma pequena diferença de cerca de 3% entre o menor e o maior valor encontrado. Já o Talhão 2 que possui cerca de 23ha a maior distância de não trabalho foi de 38,553,2526m e a menor de 36919,9171m o que deu uma diferença de cerca de 4% entre o menor e o maior valor.

Estes testes não houve a possibilidade de comparação devido à falta de equipamentos de localização que auxiliam na localização e medição dos pontos. Porém ao se realizar a normalização dos dados e comparar os boxplots gerados que é mostrado na Figura 115, há uma pequena variação média entre os resultados dos diferentes campos utilizados, o que demonstra a credibilidade do método implementado, uma vez que, ele aponta resultados melhores ao se comparar com outras abordagens definidas na literatura.

Figura 115: Comparação entre os boxplots das execuções realizadas



Fonte: Os autores

Isto demonstra que o método aqui apresentado é adaptável a diferentes tamanhos de campos e diferentes tipos de maquinários, seja em equipamentos modernos ou não.

Também notou o crescimento exponencial em relação ao tempo que cada execução é realizada, visto que ao se utilizar um campo com elevada quantidade de faixas, o tempo de execução aumenta exponencialmente. Devido a este aumento no tempo de execução, foi definida uma quantidade máxima de 1000 iterações e uma quantidade máxima de partículas.

Devido a esta limitação, pode ser que ao se realizar mais iterações, o algoritmo encontre soluções melhores, o que não foi possível de ser verificado uma vez que em alguns testes, a execução durou mais de 4 horas devido a quantidade de faixas que o campo possuía. Com o elevado tempo necessário para a realização da execução, foi preciso que se abrisse mão da possibilidade de se realizar mais iterações. Devido ao elevado tempo necessário para a execução, preferiu a utilização de poucas iterações, uma vez que a convergência ao resultado na maioria dos casos se dá antes da realização de 500 iterações ao invés de se utilizar campos menores ou com poucas trilhas de trabalho.

# Capítulo 6

## CONCLUSÕES

---

Este estudo se faz importante devido ao aumento da tecnologia no meio agrícola e o aumento da necessidade por alimentos no mundo. E também pelo fato de se melhorar alguns aspectos nas características do solo.

Quando se trata do problema de se encontrar um caminho que otimize diversos critérios, como a distância percorrida nas cabeceiras, há uma tendência de se utilizar as metaheurísticas caso o problema possua um caráter de grande complexidade computacional, chamados de NP-complexo, NP-Difícil, etc. Pois conforme pode ser verificado na Revisão Bibliográfica, diversos autores realizaram seus experimentos utilizando diversas metaheurísticas.

Dada a relevância de se utilizar metaheurísticas, este estudo busca investigar a possibilidade do emprego de metaheurísticas baseadas em inteligência coletiva na resolução do planejamento de trajetórias em campos agrícolas.

Para isso foram utilizadas duas metaheurísticas, sendo o PSO como metaheurística principal e de forma auxiliar o ACO utilizado quando não houver melhoria na execução do PSO em 20 iterações. Ele utiliza a melhor partícula até então encontrada no PSO como forma de se realizar a busca local.

Para isso, este estudo utilizou diversos trabalhos já realizados, porém não realizados testes no Brasil, exceto pelo realizado por Spekken e de Bruin (2012) que utilizou um campo no estado de Mato grosso do Sul, objetivando a verificação da melhor angulação do campo na realização da atividade agrícola.

Já o estudo aqui apresentado, buscou, além disso, o trajeto que resulte em uma rota considerada mínima ou ao menos próximo da mínima. Uma vez que devido a sua complexidade, o tempo de execução cresce exponencialmente de acordo com o tamanho do campo e conseqüentemente com a quantidade de faixas agrícolas.

Os resultados obtidos mostraram a viabilidade de se utilizar o método, uma vez que ao se comparar com o estudo realizado por Bochtis e Vougioukas (2008), houve uma redução na distância percorrida durante as manobras de retorno e conseqüentemente na distância de não trabalho que é realizada nas áreas de cabeceira.

Esta redução da distância percorrida durante a realização de uma atividade agrícola está ligada diretamente a redução da compactação do solo, uma vez que com a redução da distância percorrida, o solo é menos pressionado e causa uma menor perturbação tanto horizontal quanto vertical, uma das formas de se causar a compactação do solo.

Também há a redução no consumo de combustível, uma vez que a redução da distância de não trabalho evidencia que não está sendo realizada voltas muito longas, fator esse apontado como causa do aumento do consumo de combustível, já que pode ao se realizar uma manobra com uma distância mais longa pode haver um aumento na utilização de combustíveis em cerca de 36%.

Um dos pontos aqui apresentados é que o método pode ser utilizado tanto por pequenos agricultores quanto por grandes agricultores. Também nota-se que o método pode ser aplicado a qualquer tipo de implemento, seja trator considerado tecnológico como por equipamentos que não utilizem qualquer sistema de orientação.

Nota-se isso pelos implementos utilizados visto que o trator da marca Massey Ferguson foi fabricado no ano de 1986 enquanto os tratores de marca John Deere foram fabricados no ano de 2008 e 2012.

Embora nos testes realizados no estado de Mato Grosso do Sul não tenham sido comparados com outras formas, como por exemplo, o trajeto realizado pelo operador, este trabalho evidencia a viabilidade de utilização, uma vez que o método também define o local de passagem do maquinário, diminuindo o conjunto de marcas de pneus que pode ser observado no sítio de 36ha na Figura 39 e também diminuindo a área submetida ao tráfego intenso. Outro fator que pode ser observado a redução e até mesmo eliminação da sobreposição de áreas, o que otimiza os custos de produção com utilização de uma menor quantidade de sementes, fertilizantes e defensivos agrícolas, podendo até mesmo gerar uma maior produtividade, uma vez que o maior uso de defensivo agrícola pode ser prejudicial a planta.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste estudo foram verificadas diversas formas de realização e diversos fatores que afetam o resultado ao se utilizar o planejamento de rotas em campos agrícolas.

No entanto, diversos fatores observados necessitam de um maior aprofundamento e até mesmo desenvolvimento de métodos auxiliares para resolução. Com isso não foi possível a utilização no estudo aqui realizado.

Esses pontos podem ser tratados em trabalhos futuros e alguns dos possíveis trabalhos observados são o desenvolvimento de um método que utilize campo tridimensional, uma vez que a maioria dos campos no Brasil possuem significativa diferença de altitude em diferentes pontos. Outro ponto observado é a utilização de trajetos em campos que haja a necessidade de utilizar curvas de nível que a direção do trajeto é predefinida segundo elas.

# REFERÊNCIAS

---

BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G. The vehicle routing problem in field logistics: Part II. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 2, p. 180–188, fev. 2010.

BOCHTIS, D. D.; VOUGIOUKAS, S. G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 1, p. 1–12, set. 2008.

BOCHTIS, D.; VOUGIOUKAS, S.; TSATSARELIS, K. A Vehicle Routing Problem Formulation of Agricultural Field Operations Planning for Self-Propelled Machines. **6th CIGR World Congress Bonn Germany**, 2006.

CONAB. **Custos de Produção Agrícola**. Brasília: CONAB, 2010.

CONESA-MUÑOZ, J. et al. Route planning for agricultural tasks: A general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 204–220, set. 2016.

CONESA-MUÑOZ, J.; PAJARES, G.; RIBEIRO, A. Mix-opt: A new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment. **Expert Systems with Applications**, v. 54, p. 364–378, jul. 2016.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 80–91, out. 1959.

DE SOUZA, G. S. et al. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 603–612, 2012.

DEJONG-HUGHES, J. et al. **Soil Compaction: Causes, Effects and Control**. St. Paul: University of Minnesota Extension Service, 2001.

DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant colonies for the travelling salesman problem. **Biosystems**, v. 43, n. 2, p. 73–81, jul. 1997.

ENGELBRECHT, A. P. **Fundamentals of Computational Swarm Intelligence**. Chichester, UK: Wiley, 2005.

ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

FERREIRA, A. B. DE H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1896.

FERREIRA, K. R. et al. **Moving Objects and KML Files**. 2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops. **Anais...IEEE**, abr. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6313632/>>

FILIZOLA, H. F. Compactação e erosão do solo. In: HAMMES, V. S (Ed.). . **Julgare: percepção do impacto ambiental**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2012. p. 75–76.

GASSO, V. et al. Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. **European Journal of Agronomy**, v. 48, p. 66–73, jul. 2013.

GIRARDELLO, V. C. **Atributos físicos do solo e a produtividade de soja e milho em área sob tráfego controlado de máquinas agrícolas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

GOSS, S. et al. Self-organized shortcuts in the Argentine ant. **Naturwissenschaften**, v. 76, n. 12, p. 579–581, 1989.

HAMEED, I. A. Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 74, n. 3–4, p. 965–983, 4 jun. 2014.

HE, P. et al. Optimisation of the harvesting time of rice in moist and non-moist dispersed fields. **Biosystems Engineering**, v. 170, p. 12–23, jun. 2018.

HOUCQUE, D. **INTRODUCTION TO MATLAB FOR ENGINEERING STUDENTS**. Evanston: Northwestern University, 2005.

KARABOGA, D.; AKAY, B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 214, n. 1, p. 108–132, ago. 2009.

LAL, R.; SHARDA, A.; PRABHAKAR, P. **Optimal multi-robot path planning for pesticide spraying in agricultural fields**. 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC). **Anais...IEEE**, dez. 2017Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8264538/>>

LAMERS, J. G. et al. Controlled traffic farming systems in the Netherlands. **Soil and Tillage Research**, v. 8, n. C, p. 65–76, nov. 1986.

LONES, M. Sean Luke: essentials of metaheuristics. **Genetic Programming and Evolvable Machines**, v. 12, n. 3, p. 333–334, 10 set. 2011.

LOPES, A. .; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. **Fertilidade do solo**, p. 2–61, 2007.

LUHAIB, A. A. A. et al. **Effect of controlled traffic farming on energy saving in Australian grain cropping systems**. 2017 Spokane, Washington July 16 - July 19, 2017. **Anais...St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2017Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=48291&CID=spo2017&T=1>>

MARCO DORIGO, MAURO BIRATTARI, T. S. Ant Colony Optimization . A Computational Intelligence Technique. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 1, n. 4, p. 28–39, 2006.

MOLIN, J. P. et al. Método de avaliação de equipamentos para direcionamento de veículos agrícolas e efeito de sinais de GNSS. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 121–129, fev. 2011.

NICKABADI, A.; EBADZADEH, M. M.; SAFABAKHSH, R. A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 4, p. 3658–3670, jun. 2011.

ONU/PNUMA. Aumenta degradação dos solos no planeta Uso insustentável da terra pode provocar deterioração igual à área do Brasil até 2050. **Informativo do Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**, v. 135, 2014.

PEARL, J. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. **Telematics and Informatics**, v. 3, n. 4, p. 305, jan. 1986.

RAO, S. S. **Engineering Optimization**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321–344, 2005.

ROQUE, A. A. DE O. et al. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, p. 1536–1542, 2 set. 2011.

SANTORO, E.; SOLER, E. M.; CHERRI, A. C. Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 140–146, set. 2017.

SANTOS, L. et al. **Path planning aware of soil compaction for steep slope vineyards**. 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). **Anais...IEEE**, abr. 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8374191/>>

SEYYEDHASANI, H.; DVORAK, J. S. Reducing field work time using fleet routing optimization. **Biosystems Engineering**, v. 169, p. 1–10, maio 2018.

SPEKKEN, M. **OTIMIZAÇÃO DE PADRÕES DE TRABALHO PARA OPERAÇÕES AGRÍCOLAS EM PARCELAS**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2008.

SPEKKEN, M. et al. Planning machine paths and row crop patterns on steep surfaces to minimize soil erosion. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 124, p. 194–210, jun. 2016.

SPEKKEN, M.; DE BRUIN, S. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 2, p. 224–244, 21 abr. 2013.

SPERS, E.; HABERLI, C. **O Aumento da População Mundial e a Demanda por Alimentos**. Disponível em: <<http://markesalq.com.br/o-aumento-da-populacao-mundial-e-demanda-por-alimentos/>>. Acesso em: 30 set. 2018.

TAÏX, M. et al. Path Planning for Complete Coverage with Agricultural Machines. In: **Field and Service Robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. v. 24p. 549–558.

TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem**. Philadelphia: Philadelphia, 1987.

---

TULLBERG, J. et al. Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. **Soil and Tillage Research**, v. 176, n. September 2017, p. 18–25, mar. 2018.

TULLBERG, J. N.; YULE, D. F.; MCGARRY, D. Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 97, n. 2, p. 272–281, dez. 2007.

ZHOU, K.; BOCHTIS, D. Route planning for capacitated agricultural machines based on ant colony algorithms. **CEUR Workshop Proceedings**, v. 1498, n. March, p. 163–173, 2015.