São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

ALGORITMOS PARA TRAÇAR ROTAS DE MÁQUINAS AUTÔNOMAS EM OPERAÇÕES AGRÍCOLAS COM DEMANDA DETERMINÍSTICA

Samara Ferreira Dias
Universidade Estadual de Maringá
Avenida Colombo, 5790 - Jardim Universitário, Maringá-PR
samaraferreiradias1998@gmail.com

Landir Saviniec
Universidade Federal do Paraná - Campus Jandaia do Sul
Rua João Maximiano, 426 - Jandaia do Sul-PR
landir.saviniec@ufpr.br

Ademir Aparecido Constantino
Universidade Estadual de Maringá
Avenida Colombo, 5790 - Jardim Universitário, Maringá-PR
aaconstantino@uem.br

RESUMO

A agricultura moderna é fortemente apoiada em operações mecanizadas para plantio e colheita, com tendência de serem executadas por máquinas autônomas. No entanto, a execução dessas operações enfrenta desafios devido a dimensão e complexidade dos problemas de roteamento que surgem. Um único talhão pode gerar grafos de redes intricadas de caminhos, exigindo algoritmos eficientes para resolvê-los. Este artigo apresenta uma abordagem para um problema de roteamento agrícola com demanda determinística de insumos. O problema é modelado como um problema de roteamento em arcos capacitado e é resolvido por meio de um algoritmo baseado na meta-heurística *Iterated Local Search*. O algoritmo foi testado na operação de adubação no cultivo de cana-de-açúcar em uma cooperativa agroindustrial no Paraná. Os resultados mostram que a abordagem proposta é capaz de traçar rotas otimizadas para talhões relativamente grandes em tempo real.

PALAVRAS CHAVE. Roteirização Agrícola, Roteamento em Arcos Capacitado, Iterated Local Search.

ABSTRACT

Modern agriculture heavily relies on mechanized operations for planting and harvesting, with a trend towards being carried out by autonomous machines. However, executing these operations faces challenges due to the size and complexity of the routing problems that arise. A single field can generate intricate network graphs of paths, requiring efficient algorithms to solve them. This article presents an approach to an agricultural routing problem with deterministic input demand. The problem is modeled as a capacitated arc routing problem and is solved through an algorithm

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

based on the metaheuristic Iterated Local Search. The algorithm was tested in the fertilization operation in sugarcane cultivation at an agro-industrial cooperative in Paraná. The results show that the proposed approach is capable of tracing optimized routes for relatively large fields in real-time.

KEYWORDS. Agricultural routing, Capacitated Arc Routing Problem, Iterated Local Search.

1. Introdução

A agricultura passou por uma significativa evolução tecnológica nas últimas décadas. Impulsionada pelo surgimento da agricultura de precisão, incorporou novas técnicas de manejo e máquinas modernas que permitiram a execução rápida de inúmeras operações mecanizadas em campo. Com isso, tornou possível o cultivo de plantações em larga escala e com altos índices de produtividade.

Com relação ao trabalho das máquinas, nos últimos anos a comunidade científica tem se dedicado ao desenvolvimento de estudos para otimizar a logística de tráfego das máquinas em operações de campo. Esta logística pode considerar tanto o tráfego entre áreas localizadas em diferentes regiões geográficas [Sethanan e Neungmatcha, 2016], como também o tráfego dentro de terrenos de plantio (talhões) localizados numa mesma área geográfica [Khajepour et al., 2020].

Pesquisas recentes [Bochtis e Sørensen, 2009, 2010; Seyyedhasani e Dvorak, 2018; Khajepour et al., 2020] têm mostrado que problemas de rotas de máquinas no campo são problemas de roteamento de veículos (PRV) com restrições associadas as regras de tráfego no campo. Sendo assim, a área ficou conhecida como problemas de roteamento agrícola (PRA).

Segundo Bochtis e Sørensen [2009], a tendência para o futuro é que as máquinas no campo evoluam de um conjunto de máquinas grandes e pesadas para um conjunto de pequenos robôs capazes de executar operações agrícolas de forma totalmente autônoma. Nesse sentido, vários estudos têm se dedicado a desenvolver algoritmos para traçar as rotas de operações das máquinas no campo a partir de modelos digitais dos terrenos de plantio (*shapefiles*).

A modelagem de problemas de roteamento de máquinas no campo com técnicas de PRV foi sistematizada por Bochtis e Sørensen [2009, 2010]. Em Bochtis e Sørensen [2009] os pesquisadores propõem uma classificação para os diversos tipos de operações mecanizadas empregadas no cultivo de diferentes culturas agrícolas. Bochtis e Sørensen [2009] classificam as operações agrícolas conforme o fluxo de materiais no campo, em:

- **Fluxo de Entrada de Materiais (FEM)**: são aquelas operações que inserem material no campo (ex.: plantio e adubação).
- **Fluxo de Saída de Materiais (FSM)**: são aquelas operações que retiram material do campo (ex.: colheita)
- **Fluxo Neutro de Materiais (FNM)**: são operações onde não há fluxo de entrada ou saída de material no campo (ex.: roçada e movimentação de solo).

Além dessa classificação, Bochtis e Sørensen [2009, 2010] apresentam uma aplicação conceitual do PRV na logística de operações agrícolas. Nesses dois artigos os pesquisadores discutem, de forma teórica, como modelar o roteamento de máquinas no campo para diferentes tipos de operações agrícolas usando técnicas de PRV. Desde então, inúmeros trabalhos têm surgido nesta linha de pesquisa, com foco em investigar algoritmos para determinar rotas otimizadas para o tráfego

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

de máquinas no campo. Um artigo de revisão sobre o assunto pode ser encontrado em Utamima e Djunaidy [2022].

Problemas de roteamento de máquinas no campo geralmente consistem em minimizar o tempo de execução das operações, tempos de manobra, deslocamentos improdutivos, e entre outros, respeitando a capacidade das máquinas e levando em consideração restrições de tráfego para minimizar a compactação do solo.

Por se tratar de problemas de roteamento de veículos, os problemas de roteamento agrícola herdam as mesmas dificuldades de resolução computacional do PRV. Além disso, um PRA pode apresentar instâncias relativamente grandes quando comparadas com instâncias clássicas do PRV [Chen et al., 2016] encontradas na literatura. Dependendo do tipo de operação agrícola, um pequeno talhão pode gerar um grafo relativamente grande, exigindo assim, algoritmos extremamente eficientes para determinar a rota das máquinas.

Neste artigo, abordamos o problema de roteamento agrícola para algumas operações do tipo FEM (ex.: plantio, pulverização e adubação). Neste tipo de operação agrícola, a quantidade de material a ser distribuída em cada linha de plantio é previamente conhecida, ou seja, a demanda é determinística. O problema é modelado como um problema de roteamento em arcos capacitado (PRAC). Para resolver o problema é proposto um algoritmo baseado na metaheurística *Iterated Local Search* (ILS). Para testar e validar o algoritmo proposto, foi realizado experimentos considerando operações de adubação no cultivo da cana-de-açúcar com *shapefiles* de vários talhões de uma cooperativa agroindustrial situada na Região do Vale do Ivaí, no Estado do Paraná.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve os principais tipo de operações mecanizadas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar. A Seção 3 define o problema de roteamento agrícola abordado. A Seção 4 faz uma revisão de trabalhos relacionados. A Seção 5 detalha o algoritmo proposto, descrevendo a forma de representar soluções, o método para construir soluções iniciais, e os operadores de vizinhança utilizados. A Seção 6 discute os resultados obtidos ao testar o algoritmo proposto com dados reais do problema. Por último, a Seção 7 fecha o artigo com considerações e sugestões para trabalhos futuros.

2. Cultivo da cana-de-açúcar: estudo de caso

Uma indústria canavieira é composta por diversas áreas de plantio, chamadas de canaviais, que estão distribuídas em uma determinada região, e uma ou mais usinas responsáveis pelo processamento da cana-de-açúcar.

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar pode ser dividida em duas grandes etapas: i) Cultivo e ii) Processamento e Venda. A etapa de cultivo compreende o plantio, colheita e transporte da cana até a usina. A etapa de processamento e venda consiste em vários processos industriais para a obtenção de diferentes produtos derivados da cana (ex.: açúcar e etanol) que são comercializados posteriormente.

Durante a etapa de cultivo são empregadas inúmeras operações agrícolas mecanizadas no plantio e colheita, que possuem um alto custo financeiro [Teixeira et al., 2021].

Neste trabalho, abordaremos o estudo de caso de uma cooperativa de produtores de cana-de-açúcar localizada no Vale do Ivaí, na Região Noroeste do Paraná.

2.1. Operações mecanizadas no plantio e colheita da cana

A etapa de plantio consiste em preparar o solo, plantar as mudas, e acompanhar o crescimento da planta até a maturação. Esse processo começa com o preparo do solo, retirando do solo qualquer soqueira anterior, raízes e pedras que possam danificar os maquinários nas operações de campo [Teixeira et al., 2021]. O processo da colheita pode ser dividido em colheita e pós-colheita.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

Cada uma dessas etapas usa uma série de diferentes operações mecanizadas que são detalhadas a seguir:

- **Plantio:** é a etapa que inicia-se com o preparo do solo para o recebimento das mudas de cana. Nesta etapa são realizadas operações de sulcação e adubação das linhas de plantio. Após isso, é realizado a distribuição das mudas. Na cooperativa em estudo o plantio é manual. Em seguida, as mudas são cobertas com a aplicação de herbicidas, bioestimulantes, e defensivos. Por último, com o sulco já coberto, é realizada a aplicação de herbicidas, adubos, e quando necessário é feita a operação quebra-lombo para a uniformização do solo.

- **Colheita:** a operação de colheita consiste em cortar a cana, retirar de dentro dos talhões, carregar em caminhões e transportar até a usina. Essa operação pode ser realizada combinando-se diferentes formas de corte e carregamento. O corte pode ser feito de forma manual, com cortadeiras ou colhedoras. No corte manual e com cortadeiras a cana é cortada de forma inteira e lançada ao solo. Posteriormente a cana é juntada por uma máquina com garras mecânicas e carregada em caçambas hidráulicas que transbordam a carga para os caminhões. No corte com colhedoras, uma máquina percorre as linhas de cana, uma a uma, corta, pica e já lança os pedaços dos colmos nas caçambas dos tratores que fazem o transbordo da carga para os caminhões. A função dos tratores de transbordo é retirar a cana de dentro dos talhões e transferi-la para caminhões maiores que ficam estacionados em pontos de transbordo localizados nas estradas de acesso aos talhões. Esse procedimento de escoar a cana de dentro dos talhões com caçambas menores é adotado para reduzir a compactação do solo.

- **Pós-colheita:** a etapa de pós-colheita prepara o canavial para o próximo ciclo de crescimento da cana. Ela consiste em uma série de operações para corrigir as propriedades nutricionais solo, reduzir a compactação e eliminar ervas daninhas. As principais operações mecanizadas nesta etapa são: a aplicação de calcário para corrigir a acidez do solo; adubação orgânica para repor o nitrogênio no solo; pulverização de herbicida para eliminar ervas daninhas; e escarificação para descompactar o solo.

Tabela 1: Resumo dos tipos de operações mecanizadas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar.

Operação	**Etapa**	**Tipo de fluxo**	**Largura de trabalho**
Gradagem	Plantio	FNM	4 linhas
Sulcação	Plantio	FNM	2 linhas
Adubação	Plantio	FEM	1 linha
Distribuição de mudas	Plantio	FEM	Manual
Cobrição tratorizada e aplicação de defensivos	Plantio	FEM	4 linhas
Aplicação de herbicida	Plantio	FEM	20 linhas
Operação quebra-lombo	Plantio	FNM	4 linhas
Corte mecanizado	Colheita	FMS	1 linha
Carregamento	Colheita	FSM	*
Transporte	Colheita	FSM	1 linha
Aplicação de calcário	Colheita	FEM	2 linhas
Adubação orgânica	Colheita	FEM	5 linhas
Pulverização de herbicida	Colheita	FEM	20 linhas
Escarificação	Colheita	FNM	2 linhas

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

2.2. Classificação das operações mecanizadas

A cana é cultivada em linhas paralelas, que se estendem ao longo do talhão, com um espaçamento de 1,50 metros de largura. Sendo assim, operações de campo podem ser categorizadas pela largura de trabalho dos maquinários e também correspondem a quantidade de linhas executadas em cada passada da máquina. Por exemplo, uma máquina em operação de adubação pode adubar uma ou duas linhas por passada. Já em uma operação de pulverização pode pulverizar uma largura de 30 metros, correspondendo a 20 linhas de cana.

Na Tabela 1 apresentamos uma classificação das operações mecanizadas encontradas no cultivo da cana-de-açúcar seguindo a classificação proposta por Bochtis e Sørensen [2009]. A tabela apresenta o tipo de fluxo de materiais e a largura de trabalho das máquinas em quantidade de linhas executadas em cada passada da máquina. A largura de trabalho foi calculada com base nas especificações das máquinas utilizadas atualmente pela cooperativa.

Figura 1: Talhão de cana com linhas de plantio espaçadas em 1,50 metros.



Fonte: Os autores (2023).

3. O problema de roteamento agrícola considerado

A Figura 1 mostra a imagem do *shapefile* de um talhão de cana com linhas de plantio espaçadas em 1,50 metros. Cada linha de plantio é representada por uma polilinha de pontos georreferenciados, permitindo a extração de dados geométricos do terreno. Por motivos de simplificação, neste estudo iremos considerar apenas dados planimétricos, embora também seja possível a obtenção de dados altimétricos por meio de modelos digitais de elevação.

Dado o *shapefile* de um talhão, o PRA considerado consiste em definir um conjunto de rotas para que um conjunto de máquinas autônomas, de mesma capacidade, distribua materiais (ex.: adubo ou herbicidas) nas linhas de plantio. Para esse problema, a quantidade de material a ser distribuída em cada linha é conhecida e a capacidade de cada máquina é limitada. Sendo assim, após a máquina percorrer uma certa distância distribuindo material nas linhas, seu contêiner esvazia e ela precisa recarregá-lo a partir de um ponto estacionário situado fora do talhão. O objetivo do problema é minimizar a distância total percorrida pelas máquinas evitando trafegar mais de uma

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

vez numa mesma linha de plantio. Nesse tipo de operação, uma vez que a máquina entra em uma extremidade de uma linha de plantio, ela deve segui-la até a outra extremidade para não danificar a plantação. Deste modo, se a máquina esvaziar no meio de uma linha, ela terá que percorrer a linha outra vez, aumentando assim a compactação do solo. Então é desejável que a máquina visite uma linha de plantio somente se a ela possui material suficiente para atender toda a linha.

3.1. Modelagem do problema usando roteamento em arcos capacitado

O PRA considerado pode ser transformado em um PRAC [Golden e Wong, 1981] com restrições de tráfego agrícola. Neste caso, os veículos são as máquinas, o depósito é o ponto de reabastecimento, e as arestas com demanda são as linhas de cana. Sendo assim, o problema pode ser definido da seguinte forma:

Seja $G = (V, E)$ um grafo não direcionado representando o shape de um ou mais talhões. Onde $V = \{0, \ldots, n\}$ é um conjunto de nós e $E = \{(i, j) : i, j \in V\}$ é um conjunto de arestas representando os caminhos por onde as máquinas podem trafegar. Cada aresta $(i, j) \in E$ possui um comprimento não negativo c_{ij} e uma demanda não negativa d_{ij} associada. O nó 0 representa um depósito no qual β veículos idênticos de capacidade w estão disponíveis, onde $w \geq \max\{d_{ij}\}, (i, j) \in E$. O número de veículos β é uma variável de decisão.

Considere também que E_O é o conjunto de arestas obrigatórias, ou seja, o conjunto de aresta com demanda não nula representando as linhas de cana. As demais arestas são apenas arestas de tráfegos, possuindo demanda nula.

Sendo assim, o PRAC consiste em determinar um conjunto de rotas de máquinas, de forma que: (1) cada aresta obrigatória $a \in E_O$ seja atendida por exatamente uma máquina; (2) cada rota comece e termine no depósito; (3) a soma da demanda atendida em cada rota não exceda a capacidade w das máquinas; e (4) a distância total percorrida em todas as rotas seja minimizada.

4. Trabalhos Relacionados

A agricultura de precisão tem se beneficiado de aplicações de PRV para otimizar operações agrícolas considerando vários tipos de objetivos, tais como: minimização das distâncias percorridas pelos maquinários, redução de tempos de manobra, redução de deslocamentos improdutivos, e entre outros, em diversos tipos de operações.

Utamima et al. [2020] apresentaram um método para planejar rotas em operações de pulverização de culturas, baseado em um algoritmo genético. Os autores mostraram que o método proposto resultou em uma redução significativa do tempo de pulverização e um aumento na eficiência de uso do equipamento. Santos et al. [2009] apresentaram uma abordagem para a minimização do tempo de manobra de tratores agrícolas, considerando as restrições geométricas do campo. Khajepour et al. [2020] propuseram um modelo matemático para planejamento de rotas que levam em conta a heterogeneidade do campo, com o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos veículos agrícolas.

Santoro et al. [2017] desenvolveram um modelo para minimização do tempo de manobra dos equipamentos agrícolas em diferentes operações, considerando as características do solo e do clima. Bochtis et al. [2010] apresentaram um método para planejamento de rotas otimizadas para aplicação de fertilizantes e pesticidas, levando em conta as condições do solo e do clima. Zangina et al. [2021] propuseram um modelo de otimização para planejamento de rotas de pulverização de culturas, considerando as condições de vento e a evolução temporal das culturas.

5. Método de solução proposto

Para resolver o PRA, descrito na Seção 3, foi proposto um algoritmo baseado na metaheurística *Iterated Local Search* [Lourenço et al., 2003]. Os principais componentes do algoritmo são descritos a seguir. A Seção 5.1 define a estrutura de dados usada para representar soluções. A Seção

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

5.2 apresenta o método construtivo utilizado para gerar soluções iniciais, e a Seção 5.3 descreve o algoritmo final, detalhando os operadores de vizinhança empregados e os procedimentos de busca local e perturbação empregados no algoritmo ILS proposto.

5.1. Representação de soluções

Uma solução do PRA considerado é um conjunto de rotas. No algoritmo proposto, um conjunto de rotas S é representado por uma lista $S = [r_1, r_2, \ldots, r_n]$, onde r_i é a i-ésima rota do conjunto de rotas que compõe a solução. Uma rota $r_i = [a_1^i, a_2^i, \ldots, a_{|r_i|}^i]$ é uma lista de arestas obrigatórias $a_j^i \in E_O$ a ser visitada por uma máquina. Neste tipo de codificação, após a máquina visitar uma aresta obrigatória, ela precisa se deslocar para a extremidade de início da próxima aresta obrigatória. Este trajeto, do final da aresta anterior até o início da aresta posterior, é feito pelo menor caminho. Os caminhos mínimos entre os vértices do grafo foram gerados com o algoritmo de Floyd [Floyd, 1962].

5.2. Construção de soluções iniciais

Na literatura existem inúmeras heurísticas construtivas para o problema de roteamento em arcos capacitado. Dentre elas, existe uma família de heurísticas baseadas no paradigma guloso que usa a estratégia do vizinho mais próximo para construir um conjunto de rotas a partir do depósito. A seguir, apresentamos essas heurísticas em ordem cronológica. *Construct-and-Strike* [Christofides, 1973], *Augment-Merge* [Golden e Wong, 1981], *Path-Scanning (PS)* [Golden et al., 1983], Heurística de *Ulusoy* [Ulusoy, 1985], *PS-Ellipse* [Santos et al., 2009], e *PS-Efficiency* [Arakaki e Usberti, 2019]. De acordo com a literatura, as mais recentes são aperfeiçoamentos das mais antigas e *PS-Efficiency* é reportada ser o estado da arte em heurísticas construtivas para o PRAC. Embora as heurísticas mais recentes apresentem melhor desempenho, elas também possuem uma complexidade maior de implementação. Sendo assim, optamos por implementar uma heurística construtiva baseada na heurística PS, que é uma heurística intermediária. Isto é, ela é uma heurística simples, rápida, de fácil implementação, e apresenta bons resultados.

A heurística construtiva implementada (HC) é mostrada no Algoritmo 1. O algoritmo inicia-se com a lista de arestas obrigatórias E_O e uma solução vazia S a partir do depósito. A cada iteração, o procedimento GETARESTAMAISPROXIMA(E_O, v, $matDisp$) retorna uma lista $LAMP$ das arestas que estão mais próximas da extremidade da rota sendo construída. A lista $LAMP$ retorna somente as arestas que ainda podem ser atendidas pela máquina. Isto é, cuja demanda é menor ou igual a quantidade de material $matDisp$ ainda disponível na máquina. Esta lista pode retornar mais de uma aresta quando houver empates. Quando isso acontece, uma aresta é selecionada de forma aleatória para ser inserida na rota. Quando a lista $LAMP$ é retornada vazia, significa que a máquina está vazia, portanto não possui material suficiente para atender outras arestas obrigatórias ainda não visitadas. Sendo assim, a rota é então finalizada e adicionada na solução, e o procedimento reinicia uma nova rota a partir do depósito, com a máquina recarregada novamente. O algoritmo termina quando não houver mais arestas obrigatórias a serem visitadas.

5.3. Algoritmo ILS proposto

O algoritmo ILS proposto é descrito no Algoritmo 2. O algoritmo recebe uma solução S construída pelo Algoritmo 1 e aplica um procedimento de busca local, para refinar a solução, e um procedimento de perturbação para escapar de mínimos locais. Este procedimento é repetido por um número máximo de iterações i_{max}.

Os operadores de vizinhança comumente empregados em procedimentos de busca local para o PRAC são: *Insertion*, *Invertion*, *Swap*, *2-Opt*, e *Merge-split* [Chen et al., 2016; Khajepour et al., 2020].

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

Algoritmo 1: Heurística HC implementada.

GERARSOLUCAOINICIAL(E_O, w)

```
1  S = ∅                                          // inicializar uma solução vazia
2  v = 0                                          // vértice atual, iniciar no depósito
3  matDisp = w                                    // material disponível no container da máquina
4  rota = ∅                                       // rota sendo construída
5  while (E_O ≠ ∅) do
6      LAMP = GETARESTAMAISPROXIMA(E_O, v, matDisp)
7      if LAMP ≠ ∅ then
8          Selecionar uma aresta a = (i, j) aleatoriamente em LAMP
9          rota = rota ∪ a
10         Remover a da lista de arestas obrigatórias E_O
11         matDisp = matDisp − demanda_{i,j}
12         v = j
13     else
14         S = S ∪ rota                           // adicionar a rota na solução
15         rota = ∅
16         v = 0                                  // reiniciar no depósito
17         matDisp = w                            // recarregar a máquina
18 if rota ≠ ∅ then
19     S = S ∪ rota
20 return S
```

Algoritmo 2: Algoritmo ILS proposto.

ILS(S, i_{max})

```
1  S* = S                                         // melhor solução global
2  i = 0
3  while (i < i_max) do
4      S = PERTURBARSWAPINTERROTA(S, 1)           // swap inter-rota
5      S = BUSCALOCALSWAP(S)                      // swap intra-rota
6      if f(S) ≤ f(S*) then
7          S* = S
8      else
9          S = S*
10     i = i + 1
11 return S*
```

Neste trabalho, utilizou-se os operadores *Swap* e *Invertion* nos procedimentos de perturbação e busca local do algoritmo ILS proposto. O operador *Swap* consiste em trocar duas arestas de posição entre duas rotas e o operador *Invertion* consiste em inverter o sentido de uma aresta em uma rota. O operador implementado consiste numa combinação de *Swap* e *Invertion*. Ele troca duas arestas de posição dentro de uma mesma rota (intra-rota) ou entre duas rotas distintas (inter-rota). Após a troca, é testada a inversão de cada uma das duas arestas e a melhor opção é retornada. Ou seja, ele retorna a melhor das quatro soluções vizinhas possíveis nesse tipo de movimento. Sendo assim, a lógica do ILS proposto consiste em:

- **Procedimento de perturbação**: aplicar um movimento *Swap* inter-rota aleatório entre duas rotas, de forma que a soma da demanda em cada rota não exceda a capacidade w das máqui-

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

nas.

- **Procedimento de buscal local**: partir da solução perturbada e aplicar a seguinte busca. Para cada rota envolvida na perturbação, testar todos os movimentos de *Swap* intra-rota possíveis, utilizando a estratégia de busca *First Improvement*, que aceita o primeiro vizinho que melhora a solução corrente. Este procedimento é repetido enquanto houver melhorias na solução corrente.

A função de avaliação de uma solução S é descrita na Equação 1:

$$f(S) = \sum_{r \in S} dist_r \tag{1}$$

Onde $dist_r$ é a distância total percorrida em uma rota r que compõe a solução S, incluindo arestas obrigatórias e não obrigatórias.

Uma vez que o algoritmo construtivo gera soluções iniciais que não violam a restrição de capacidade e os procedimentos de perturbação e busca local mantêm essa propriedade, não há necessidade de controlar essa restrição na função objetivo.

6. Experimentos computacionais

Para avaliar o desempenho do algoritmo *ILS* proposto, foram realizados experimentos com sete instâncias reais da cooperativa de estudo, considerando dois cenários para a capacidade das máquinas ($w = 3$ toneladas e $w = 5$ toneladas). Esses dois cenários são baseados em especificações extraídas de máquinas que realizam as operações de adubação na cooperativa em estudo atualmente. A demanda de adubo por metro considerada em todas as instâncias é de 0,75 kg/metro. Este parâmetro é baseado na quantidade, por hectare, de adubo orgânico (cama de frango) geralmente utilizado para fertilizar canaviais. O posicionamento dos pontos de depósito foi feito de forma empírica.

O algoritmo *ILS* foi implementado em *Python 3.8.10* usando a IDE *Spyder* 3.3.6+dfsg1-4build1. Os experimentos foram conduzidos em um computador com processador Intel (R) Core (TM) i3-7020U CPU @ 2.30GHz, 4GB de memória RAM, e sistema operacional *Linux Mint 20.3*.

6.1. Resultados

A Tabela 2 apresenta os resultados dos experimentos computacionais realizados com as sete instâncias propostas. A tabela apresenta três seções de colunas. Na primeira seção são apresentadas as características das instâncias (nome, quantidade de vértices, quantidade de arestas totais, e quantidade de arestas obrigatórias). Na segunda e terceira seção são apresentados os resultados para os cenários com capacidade de 3 e 5 toneladas. Para cada instância o algoritmo foi executado cinco vezes usando $i_{max} = 1.000$ iterações em cada execução. Para cada cenário é apresentado o valor mediano da solução inicial e da solução final (em km), e dos tempos de execução (em segundos) do algoritmo de *Floyd*, da heurística construtiva e do algoritmo *ILS*.

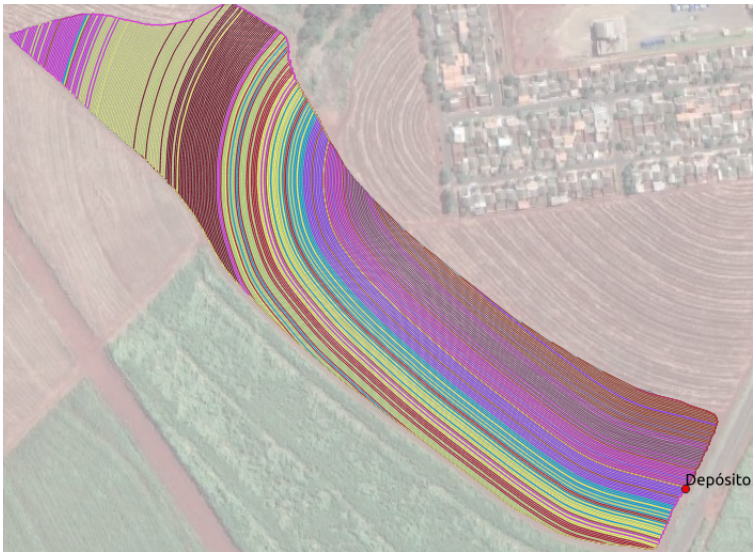
Esses resultados mostram que a heurística construtiva é bastante rápida para construir soluções iniciais e que o método *ILS* não fez grandes melhorias na solução inicial. Além disso, a execução de 1000 iterações do método *ILS* apresentou um custo computacional considerável, não apresentando um bom custo benefício. A partir dessa análise, surgem algumas hipóteses. A primeira delas é que, devido as instâncias utilizadas serem compostas por talhões com formatos não muito irregulares, a heurística construtiva é capaz de construir soluções próximas do ótimo. O que explicaria o fato do *ILS* não encontrar grandes melhorias. A segunda hipótese é que a busca local empregada no *ILS* não seja eficaz para obter melhorias. Em outras palavras, acaba presa em

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

Tabela 2: Resultados nas sete instâncias mostrando os valores medianos obtidos em 5 execuções.

Instância				Capacidade 3 ton					Capacidade 5 ton				
	|V|	$\|E\|$	$\|E_O\|$	Floyd	HC	ILS	Sol. HC	Sol. ILS	Floyd	HC	ILS	Sol. HC	Sol. ILS
BSA_01	523	783	260	129	≈ 0	239	91,19	83,69	136	≈ 0	760	81,58	77,06
BSA_03	410	613	203	60	≈ 0	531	36,94	36,40	68	≈ 0	1612	34,56	34,31
BSB_05	325	484	159	37	≈ 0	168	55,05	53,20	35	≈ 0	477	50,26	49,83
BSB_07	646	420	138	253	≈ 0	99	135,11	133,36	272	≈ 0	435	121,24	121,20
MANA_05	255	379	124	16	≈ 0	117	38,67	38,03	16	≈ 0	330	37,60	37,56
MANA_07	282	420	138	20	≈ 0	562	22,00	21,82	20	≈ 0	562	22,01	21,82
MANB_02	370	512	180	50	≈ 0	690	38,80	38,68	50	≈ 0	690	38,79	38,69

Figura 2: Rotas percorridas por uma máquina com capacidade de 5 toneladas na instância BSA_01.



Fonte: Os autores (2023).

mínimos locais. A segunda hipótese parece ser a mais provável, uma vez que é bastante reportado na literatura o fato de algoritmos de busca local com operadores de *swap* apresentarem baixa eficácia.

A Figura 2 mostra, em escala de cores, as diferentes rotas geradas pelo algoritmo *ILS*, que uma máquina deve seguir para distribuir o adubo sobre as linhas de cana. Neste *shape*, o local de reabastecimento da máquina (depósito) foi fixado numa estrada de acesso ao terreno de plantio. Como mostrado na figura, em muitas rotas a visita as linhas de cana não são feitas de forma sequencial, uma após a outra, como geralmente é feito pelos operadores no método convencional. Isso acontece porque o algoritmo visita as linhas obedecendo a capacidade da máquina e evitando esvaziar a máquina no meio das linhas. Essas restrições evitam as linhas serem visitadas duas vezes, reduzindo assim a compactação do solo.

7. Conclusão

Neste artigo foi proposto uma abordagem heurística para determinar a rota de máquinas autônomas em operações agrícolas, onde a quantidade de material a ser coletada ou distribuída no campo é determinística. Exemplos desse tipo de operações são a adubação e a pulverização de plantações. O algoritmo foi testado com operações de adubação de cana-de-açúcar usando *shapes* reais de uma usina no Estado do Paraná. Os resultados mostraram que o método proposto é capaz de gerar rotas para uma máquina autônoma, otimizando a distância percorrida e minimizando a com-

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

pactação do solo, com tempo computacional factível. Considerando apenas a heurística construtiva, o método é capaz de traçar rotas em tempo real. Além disso, o método proposto pode ser aplicado para executar os mesmos tipos de operações em outras culturas e também pode ser usado em máquinas com diferentes larguras de trabalho, bastando apenas que o grafo do problema seja gerado de acordo com a largura de trabalho da máquina. Para futuros trabalhos, pretende-se aprimorar a busca local do método, incluir testes usando instâncias mencionadas na literatura e compará-las com outros procedimentos. Além disso, realizar experimentos em instâncias complexas envolvendo múltiplos talhões, onde a máquina executaria operações simultâneas. Para concluir, espera-se que métodos de PRV, como o proposto nesse artigo, contribuam para determinar o sucesso de máquinas autônomas no campo.

8. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), sob o Código de Financiamento 001, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Proc. 309200/2022-9.

Estendemos nossos agradecimentos ao Grupo de Pesquisa de Engenharia de Algoritmos (GPEA) e ao Laboratório de Engenharia de Algoritmo (Lab. Leal).

Referências

Arakaki, R. K. e Usberti, F. L. (2019). An efficiency-based path-scanning heuristic for the capacitated arc routing problem. *Computers &amp Operations Research*, 103:288–295.

Bochtis, D. e Sørensen, C. (2009). The vehicle routing problem in field logistics part i. *Biosystems Engineering*, 104(4):447–457.

Bochtis, D. e Sørensen, C. (2010). The vehicle routing problem in field logistics: Part II. *Biosystems Engineering*, 105(2):180–188.

Bochtis, D., Sørensen, C., e Vougioukas, S. (2010). Path planning for in-field navigation-aiding of service units. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1):80–90.

Chen, Y., Hao, J.-K., e Glover, F. (2016). A hybrid metaheuristic approach for the capacitated arc routing problem. *European Journal of Operational Research*, 253(1):25–39.

Christofides, N. (1973). The optimum traversal of a graph. *Omega*, 1(6):719–732.

Floyd, R. W. (1962). Algorithm 97: Shortest path. *Communications of the ACM*, 5(6):345.

Golden, B., Dearmon, J., e Baker, E. (1983). Computational experiments with algorithms for a class of routing problems. *Computers &amp Operations Research*, 10(1):47–59.

Golden, B. L. e Wong, R. T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11(3):305–315.

Khajepour, A., Sheikhmohammady, M., e Nikbakhsh, E. (2020). Field path planning using capacitated arc routing problem. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173:105401. ISSN 0168-1699.

Lourenço, H. R., Martin, O. C., e Stützle, T. (2003). *Iterated Local Search*, p. 320–353. Springer US, Boston, MA.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867

Santoro, E., Soler, E., e Cherri, A. (2017). Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141:140–146.

Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., e Current, J. R. (2009). An improved heuristic for the capacitated arc routing problem. *Computers &amp Operations Research*, 36(9):2632–2637.

Sethanan, K. e Neungmatcha, W. (2016). Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations. *European Journal of Operational Research*, 252(3):969–984.

Seyyedhasani, H. e Dvorak, J. S. (2018). Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a dynamic multiple depot vehicle routing problem representation. *Biosystems Engineering*, 171:63–77. ISSN 1537-5110.

Teixeira, E. S., Rangel, S., de O. Florentino, H., e de Araujo, S. A. (2021). A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. *International Transactions in Operational Research*.

Ulusoy, G. (1985). The fleet size and mix problem for capacitated arc routing. *European Journal of Operational Research*, 22(3):329–337.

Utamima, A. e Djunaidy, A. (2022). Agricultural routing planning: A narrative review of literature. *Procedia Computer Science*, 197:693–700.

Utamima, A., Reiners, T., e Ansaripoor, A. H. (2020). Automation in agriculture. In *Proceedings of the 2020 12th International Conference on Computer and Automation Engineering*. ACM.

Zangina, U., Buyamin, S., Aman, M. N., Abidin, M. S. Z., e Mahmud, M. S. A. (2021). Autonomous mobility of a fleet of vehicles for precision pesticide application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186:106217.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174867
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174867