UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

RODRIGO TORRES SEARES

ALGORITMO EVOLUTIVO PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS

ALEGRE - ES
2017

RODRIGO TORRES SEARES

ALGORITMO EVOLUTIVO PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

ALEGRE - ES

2017

RODRIGO TORRES SEARES

ALGORITMO EVOLUTIVO PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Aprovado em 15 de dezembro de 2017.

BANCADA EXAMINADORA

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. MSc. Valeria Alves da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. MSc. Dayan de Castro Bissoli
Universidade Federal do Espírito Santo

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível”.

Max Weber

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças para superar todas as dificuldades não só na faculdade como na vida.

A toda a minha família, principalmente aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar e a batalhar.

Aos meus amigos do time de futsal do curso de Sistemas de Informação, especialmente aos amigos Hans Naumann e João Vitor Costa.

Ao professor Geraldo Regis Mauri, por todas as orientações que iniciaram no projeto de iniciação científica e se estendeu até o trabalho de conclusão de curso.

Aos meus amigos de república que me acompanharam na maior parte da faculdade, em especial ao Denis Bittencourt e Wagner Amorim pelos conselhos, pela paciência com minhas piadinhas ruins e pelo amparo nos estudos, e claro não poderia deixar de fora o café milagroso do Josimar Moraes.

Aos meus amigos do núcleo de tecnologia de informação da UFES de Alegre, que contribuíram para o meu crescimento profissional.

A empresa Click Junior, pela experiências e conhecimentos adquiridos durante a graduação.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

O Problema de Rotação de Culturas (PRC) consiste em alternar culturas em uma área de plantio dividida em lotes por um determinando período de tempo, com o intuito de maximizar o lucro da produção e respeitando algumas restrições impostas. Neste trabalho, pretende-se utilizar um algoritmo evolutivo proposto recentemente, chamado *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control* (HGSADC), como alternativa para resolução de um caso específico do PRC, chamado de Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O PRC-A apresenta as mesmas restrições do PRC, porém, considera também uma noção de vizinhança entre os lotes, ou seja, utiliza a distribuição geográfica dos mesmos para impedir que determinadas situações ocorram. Já o HGSADC é um método que apresenta bons resultados para diferentes tipos de problemas de roteamento de veículos, e ainda não foi explorado como alternativa de solução para o PRC-A.

Palavras-chave: Rotação de Culturas; *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control*; Otimização Combinatória.

ABSTRACT

The Crop Rotation Problem (PRC) consists of alternating crops in a planted area divided into lots for a determined period of time, in order to maximize the profit of production and respecting some imposed constraints. In this work, we intend to use a recently proposed evolutionary algorithm called Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control (HGSADC) as an alternative method to solve a specific case of the PRC called Crop Rotation Problem with Adjacency Constraints (PRC-A). The PRC-A presents the same constraints as the PRC, but also considers a notion of neighborhood among the lots, that is, it uses the geographical distribution of the area to prevent certain situations. The HGSADC is a method that presents good results for different types of vehicle routing problems, and has not been explored as an alternative solution for the PRC-A.

Keywords: Crop Rotation; Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control; Combinatorial Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das adjacências em uma área dividida em 4 lotes.Figura 1 - Representação das adjacências em uma área dividida em 4 lotes..... 13
Figura 2 - Exemplo de cruzamento.. 18
Figura 3 - Pseudocódigo do HGSADC.. 21
Figura 4 - Relação de adjacência entre lotes de cada instância.. 23
Figura 5 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 10 lotes.....27
Figura 6 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 15 lotes.....28
Figura 7 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 20 lotes.....28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Culturas disponíveis para o plantio.Figura *1* - Representação das adjacências em uma área dividida em 4 lotes..... 23
Figura 2 - Exemplo de cruzamento.. 24
Tabela 3 - Parâmetros utilizados pelo HGSADC.Figura *4* - Relação de adjacência entre lotes de cada instância.. 26
Figura 5 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 10 lotes.....27
Tabela 5 - Comparação das soluções do HGSADC com outros métodos da literatura. 29
Tabela 6 - Comparação dos tempos computacionais médios atingidos.....30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1. O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA 11

1.2. OBJETIVOS 14

1.2.1. Objetivo Geral 14

1.2.2. Objetivos Específicos 14

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 14

2. REVISÃO DA LITERATURA 15

3. METODOLOGIA 17

3.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DO HGSADC 17

3.1.1 População Inicial 17

3.1.2 Seleção dos Pais 18

3.1.3 *Crossover* 18

3.1.4 Educação 19

3.1.5 Reparação 19

3.1.6 Seleção de Sobreviventes 20

3.1.7 Ajuste de Peso 20

3.1.8 Diversificação 21

3.1.9 Pseudocódigo do HGSADC 21

4. TESTES COMPUTACIONAIS 23

5. RESULTADOS OBTIDOS 26

5.1. RESULTADOS COMPUTACIONAIS 26

5.2. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA 29

6. CONCLUSÕES 31

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 32

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos problemas de otimização linear em nosso cotidiano. Basta fazer uma pesquisa rápida pela literatura que se encontra uma grande variedade de problemas. Como exemplo, tem-se o problema de roteamento de veículos, programação de roteiros turísticos, programação de jogos e o que será abordado neste trabalho, o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A).

O PRC-A, segundo Aliano Filho (2012), consiste em alternar, em um determinado intervalo de tempo, culturas de diferentes famílias botânicas de vegetais numa mesma área dividida em lotes, impedindo, entre outras restrições, o cultivo de mesma família botânica em lotes vizinhos (adjacentes).

Neste trabalho, para resolução do PRC-A, é proposto o uso da meta-heurística *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control*, abordada por Vidal et al. (2012) e que, por sua vez, ainda não foi explorada para resolução dos problemas dessa natureza.

1.1. O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA

Em virtude do baixo custo de produção aliado a facilidade de implantação, a monocultura é a produção agrícola predominante desde o período colonial no Brasil. Entretanto, a monocultura em longo prazo acarreta no uso de pesticidas tóxicos, que são excessivamente prejudiciais ao meio ambiente, além de facilitar a ação e prevalência de pragas e patógenos. Além disso, a monocultura ocasiona a exaustão do solo, implicando no uso de proporções cada vez maiores de adubo inorgânico (ALTIERI, 2002; GLIESSMAN, 2000).

Para evitar os problemas citados em decorrência do uso da monocultura, é primordial a ampliação do uso da policultura de forma sustentável, levando em conta a preservação ambiental, o controle biológico de pragas e os ganhos econômicos (ALIANO FILHO, 2012).

A rotação de culturas é fundamental para o gerenciamento de hortaliças, pois essas espécies sofrem com a quantidade elevada de ataques de pragas e doenças. A rotação de cultura consiste em impedir o plantio consecutivo de uma mesma família

botânica em uma mesma área de cultivo ao longo do tempo. Consequentemente, poupa-se o solo da aglomeração de organismos que causam danos às culturas, proporcionando uma facilitação no manejo (SEDIYAMA, 2014).

A rotação de culturas também proporciona melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo, assim como o controle de plantas daninhas, doenças, pragas, reposição de restos orgânicos e a proteção do solo contra a ação dos agentes climáticos (ARF et al., 1999).

Para a utilização da rotação de culturas, algumas estratégias são sugeridas por ARF et al. (1999), ALTIERI (2012) e GLIESSMAN (2005):

1. Impedir cultivos de mesma família botânica em áreas próximas;
2. Impossibilitar o cultivo contínuo de plantas de mesma família botânica em uma mesma área;
3. Assegurar o plantio de adubação verde;
4. Estabelecer período de pousio;
5. Respeitar os ciclos e período de plantio de cada cultura.

A primeira estratégia tem como objetivo dificultar a atividade de pragas, pois culturas de mesma família são sujeitas a agentes patológicos semelhantes. Desse modo, a combinação de culturas de diferentes famílias botânicas trará um impacto positivo na produção podendo reduzir os ataques de pestes (ALTIERI, 2002).

A segunda estratégia visa proteger e atingir o uso mais adequado dos recursos disponibilizados pelo solo, uma vez que o plantio contínuo de uma mesma cultura em uma mesma área ocasiona o esgotamento de forma mais rápida dos recursos minerais do solo, mesmo utilizando altas doses de adubo químico (ALIANO FILHO, 2012).

Na terceira estratégia, o uso de adubação verde fornece nutrientes e matéria orgânica para o solo de forma efetiva e simples. As leguminosas se destacam por produzirem uma grande quantidade de biomassa e, além disso, possuem a capacidade de agregar as bactérias que modificam o nitrogênio do ar em compostos

nitrogenados, resultando na disponibilidade desses nutrientes para as culturas posteriores (SANTOS et al., 2013).

Na quarta estratégia, o período de pousio resume-se em interromper o cultivo do solo e deixar a vegetação da área crescer de forma natural por um período definido, para recuperação da estrutura do solo e seus nutrientes naturais.

Por fim, na quinta e última estratégia, deve-se garantir que a semeadura e a colheita de uma cultura sejam feitas na época exata, respeitando assim o ciclo e a época de plantio.

O Problema de Rotação de Culturas (PRC) consiste em diversificar culturas a cada determinado período de tempo em uma mesma área dividida em lotes, respeitando diversas restrições, como as descritas anteriormente (ALIANO FILHO, 2012; GLIESSMAN, 2000).

Já o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A) é um caso específico do PRC. No PRC-A, leva-se em consideração, além das restrições do PRC, uma restrição específica, que impede o cultivo de culturas de mesma família botânica em lotes adjacentes (vizinhos). Segundo Santos (2007), problemas do tipo PRC-A possuem o objetivo de maximizar o plantio nas áreas produtivas em que as restrições de plantio se estendem às áreas vizinhas.

A Figura 1 ilustra uma área dividida em 4 lotes: L1, L2, L3 e L4. A partir de então, pode-se definir um grafo no qual os nós representam os lotes e as arestas a relação de vizinhança (adjacência) entre eles. Levando em conta a restrição específica do PRC-A, culturas de uma mesma família botânica não poderiam ser cultivadas simultaneamente nos lotes L1 e L2, por exemplo. Porém, poderiam ser cultivadas nos lotes L1 e L4.

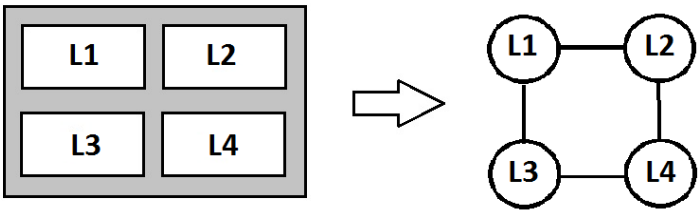

Figura 1 - Representação das adjacências em uma área dividida em 4 lotes.

Existem diferentes abordagens para o PRC, considerando diversas restrições e diferentes objetivos. Neste trabalho, será considerado o PRC-A com o objetivo de maximizar o lucro da produção.

Trabalhos como o de Lemalade et al. (2011) e Santos et al. (2011) descrevem a dificuldade dos problemas de rotação de culturas, devido às características das variáveis envolvidas e o volume de restrições a serem consideradas.

1.2. OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos relacionados a este trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a aplicação da meta-heurística *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control* (HGSADC) para resolução do Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A).

1.2.2. Objetivos Específicos

a) Adaptar o HGSADC para resolução do PRC-A;
b) Implementar o HGSADC para resolver o PRC-A;
c) Avaliar o desempenho da meta-heurística por meio de experimentos computacionais comparados a outros trabalhos existentes na literatura.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante desse trabalho está estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, contendo alguns dos principais trabalhos correlatos. A metodologia utilizada é descrita no Capítulo 3, no qual são apresentados os principais componentes do HGSADC. Os resultados obtidos são descritos no Capítulo 4 e as conclusões são apresentadas no Capítulo 5, seguidas pelas referências consultadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Existem diversos trabalhos relacionados ao Problema de Rotação de Cultura (PRC), apresentando a sua aplicabilidade em diferentes tipos de abordagem. Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica em ordem cronológica envolvendo alguns dos principais e mais recentes trabalhos relacionados ao PRC.

Santos et al. (2007) apresenta uma modelagem de otimização binária para estabelecer uma programação de rotação de culturas com restrições de adjacências em uma área de plantio dividida em lotes. O objetivo do modelo proposto é maximizar a ocupação dos lotes, respeitando as restrições do PRC-A. Foram utilizados dados reais de 28 culturas distintas, de diversas famílias, considerando uma área dividida em até 10 lotes.

Em Santos et al. (2011), são abordados dois casos específicos do PRC: o PRC com restrições de Adjacências (PRC-A) e o PRC com atendimento de Demanda (PRC-D). O objetivo é maximizar a ocupação das áreas produtivas em que as restrições de plantio são estendidas às áreas adjacentes. Foram realizados experimentos computacionais usando dados reais de rotação de 2 anos e envolvendo até 28 culturas.

Aliano Filho (2012) apresenta um modelo binário de otimização para o problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A) e Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências e Demanda (PRC-A-D). O objetivo é buscar uma programação de plantio de hortaliças que maximize o lucro. Para resolução do problema as seguintes meta-heurísticas foram implementadas: Algoritmo Genético, *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético com *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético com Busca Local. Para os experimentos computacionais, foram consideradas 29 culturas com 10, 15 e 20 lotes.

Araújo e Mauri (2013) propõem a aplicação da meta-heurística *Clustering Search* (CS) para resolução do PRC-A e apresentam uma comparação entre os resultados obtidos com o CS e os métodos proposto por Aliano Filho (2012). O CS apresentou-se como uma nova e boa alternativa para resolução do PRC-A. Os experimentos computacionais levaram em conta 29 culturas de plantio e instâncias com 10, 15 e 20 lotes.

Costa et al. (2014) e Aliano Filho (2012) abordam o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Demanda (PRC-D). Nessa modelagem, a novidade introduzida no modelo proposto é de estocar colheitas.

Mateveli (2014) retrata a utilização de algoritmos evolutivos para resolver o PRC-A. Em seu trabalho foram utilizados dois tipos diferentes de algoritmos evolutivos, o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético, que se demostraram alternativas eficientes para aumentar a lucratividade do problema, destaca-se que o Algoritmo Genético que obteve um desempenho superior ao o Algoritmo Memético.

Por fim, Decothé (2016) também aborda o PRC-A com um algoritmo recente, que já apresentou bons resultados em problemas complexos encontrados na literatura. A meta-heurística implementada pelo autor foi a *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), e os resultados superaram aqueles obtidos pelos demais trabalhos da literatura.

3. METODOLOGIA

A metodologia abordada neste projeto consiste na aplicação da meta-heurística *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control* (HGSADC) para resolução do Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O HGSADC é um algoritmo evolutivo proposto por Vidal et al. (2012) para resolução de problemas de roteamento de veículos que se baseia nos Algoritmos Genéticos. Porém, além das características tradicionais de um algoritmo evolutivo, o HSGADC inclui diversos recursos avançados, em termos de avaliação da solução, geração de filhos e gestão da população.

A motivação da escolha do HGSADC como meta-heurística para resolução do PRC-A leva em consideração o fato da mesma ter apresentando bom desempenho em qualidade de solução, assim como o fato de não constar na literatura nenhum trabalho que tenha explorado a meta-heurística para o PRC-A.

Segundo Vidal et al. (2012), a meta-heurística HGSADC funciona evoluindo uma população de indivíduos, gerenciando as soluções viáveis e inviáveis que são mantidas em dois grupos separados. Aplica-se sucessivamente um número de iterações para selecionar dois indivíduos pais e realizar um cruzamento, gerando um novo indivíduo. Esse novo indivíduo passa por uma educação e reparação para, em seguida, ser incluído na subpopulação apropriada de acordo com sua viabilidade.

No HGSADC, o mecanismo que seleciona os indivíduos pais para o cruzamento e os indivíduos para sobrevivência leva em consideração o custo da solução e a contribuição que o indivíduo proporciona para a diversidade da população. Desse modo, o mecanismo contribui para conservar um nível elevado de diversidade entre os indivíduos (VIDAL et al., 2012).

3.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DO HGSADC

3.1.1 População Inicial

O gerador de população tem como objetivo criar indivíduos de forma aleatória respeitando somente o ciclo de cada cultura, o plantio consecutivo de culturas da mesma família e as adjacências.

Neste trabalho, gera-se os indivíduos de forma aleatória, sendo uma cultura randomicamente sorteada e inserida na matriz de programação do lote dentre o mês de início e término da cultura, e caso não seja adjacente a nenhuma cultura da mesma família. Se eventualmente a cultura sorteada não se encaixa na programação de plantio, uma nova cultura é sorteada aleatoriamente. O processo é repetido por 100 vezes para cada lote.

Os indivíduos são agrupados em dois subgrupos de acordo com as violações das restrições : *Pf* se o indivíduo respeitar todas as restrições ou *Pu* caso o indivíduo viole qualquer restrição imposta pelo problema de PRC-A.

3.1.2 Seleção dos Pais

Foi utilizada a seleção por torneio, na qual se escolhe de forma aleatória duas soluções em qualquer população (*Pf* ou *Pu*) que competem entre si. A solução que apresentar maior FO ganha a disputa, o processo é repetido mais uma vez para selecionar um segundo pai.

3.1.3 *Crossover*

O cruzamento escolhido para esse trabalho foi o crossover de um ponto. Nesse caso um único ponto de corte é selecionado de forma arbitrária, e a partir desse ponto os genes dos progenitores são agrupados e herdados pelo descendente

Como podemos analisar na Figura 2, sorteia-se um ponto de corte, a primeira parte até o tracejado são os genes que o descendente irá herdar do primeiro progenitor, o restante dos genes são heranças do segundo progenitor. Logo, o material genético dos progenitores, combinado, gera uma nova solução.

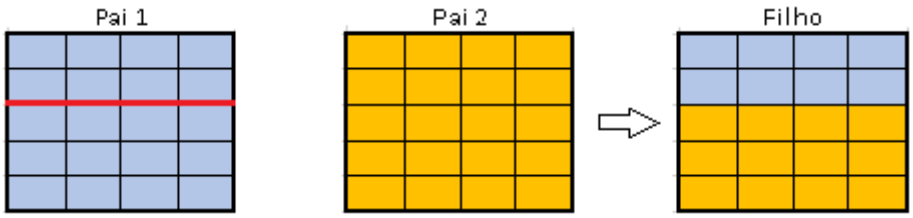

Figura 2 - Exemplo de cruzamento.

3.1.4 Educação

Nessa etapa, os filhos provenientes do cruzamento são educados com probabilidade γ_{educ}, ou seja, passam por uma busca local para aumentar o valor da função objetivo.

A busca local é dividida em duas etapas. Na primeira etapa, o algoritmo rastreia as duas programações de plantio de maior rendimento no indivíduo, ou seja, verifica entre os lotes, qual programação de plantio retorna o maior lucro e o segundo maior lucro, ignorando o tamanho dos lotes.

Essas duas programações são distribuídas por todos os lotes, contudo respeitando as adjacências entre os lotes, isto é, caso a programação de plantio com o maior lucro seja inserida no lote A, e o lote B seja adjacente ao lote A, o lote B irá receber a programação com o segundo maior lucro, o mesmo processo é repetido até preencher todos os lotes.

Na segunda etapa, o algoritmo seleciona 3 lotes. O primeiro lote a ser escolhido é aquele que apresenta o maior número de ocorrência de pousios em sua programação de plantio. O segundo lote é o que contém menor lucratividade comparada com os demais lotes, e o terceiro lote é o que apresenta a programação de plantio com menor lucratividade.

De forma aleatória, culturas são removidas dos lotes selecionados, e novas culturas são randomicamente alocadas nos espaços abertos pelas culturas removidas. Esse processo é repetido enquanto não houver um aumento da função objetivo da solução.

A solução obtida após o processo de educação é alocada diretamente na subpopulação de acordo com a sua viabilidade, ou seja, caso apresente qualquer violação, essa solução é alocada em *Pu*, caso contrário em *Pf*.

3.1.5 Reparação

Toda solução educada é reparada com probabilidade γ_{rep}. A reparação tem como objetivo viabilizar a solução, ou seja, todas as culturas que violam alguma das restrições do PRC-A são retiradas e outras culturas escolhidas randomicamente são plantadas de forma que a solução fique viável.

3.1.6 Seleção de Sobreviventes

Quando a população de *Pf* ou *Pu* atinge o limite, o processo de sobrevivência é iniciado no subgrupo que atingiu o limite de população. Nesse processo, os indivíduos que possuem semelhanças são removidos. A análise de similaridade entre as soluções, é executada por meio do cálculo de distância de Hamming d_{Ham}(HAMMING, 1950). O cálculo é realizado mediante a contagem das desigualdades na programação de plantio entres as soluções. As soluções que apresentarem d_{Ham} = 0 serão removidas da subpopulação.

Além do cálculo de Hamming, os indivíduos são avaliados e classificados de acordo com a sua colaboração na diversidade do subgrupo. Essa classificação é dada pelo cálculo do valor *fitness* de cada solução. O *fitness* leva em consideração a distância para as soluções vizinhas, a posição (*rank*) de cada solução baseada no custo da solução, e o tamanho das soluções elites. O tamanho das soluções elites é definido pelo número de indivíduos de cada subgrupo, multiplicado pelo parâmetro γ_{elite}. O tamanho da vizinhança é definido pelo número de indivíduos de cada subpopulação, vezes o parâmetro γ_{close}.

As soluções são ranqueadas de acordo com o valor do fitness e, por consequência a solução com pior *fitness* e a solução com melhor *fitness* são removidas das suas respectivas subpopulações.

3.1.7 Ajuste de Peso

Quando o número de iterações da meta-heurística atingir o valor It_{adjust}, os pesos são ajustados de acordo com a quantidade de violações encontradas para cada uma das restrições de suas subpopulações.

Considerando a violação de adjacência para exemplificar, todas as violações na subpopulação de *Pu* são enumeradas, assim como todas as violações de adjacência na subpopulação de *Pf*. Caso o número de violações de *Pu* seja menor ou igual a 95% da quantidade de violações de *Pf* multiplicado por ξ^{ref}, que é a proporção de referência para soluções viáveis, então o valor do peso da adjacência é ajustado em 20%. Caso contrário, os valores do peso da adjacência são ajustados em –20%. O mesmo ajuste ocorre com o peso das violações de adubação verde e pousio.

3.1.8 Diversificação

Serão mantidos os três indivíduos que portem as melhores FOs de cada população. Novas soluções são geradas e agregadas ao subgrupo *Pu* se inviáveis ou em *Pf* se viáveis.

3.1.9 Pseudocódigo do HGSADC

O pseudocódigo do algoritmo implementado neste trabalho é apresentado na Figura 3.

```
1.  Criar as populações iniciais Pf e Pu
2.  enquanto número de iterações sem melhora < It_max e tempo < T_max
    faça
3.     Selecionar dois pais p1 e p2
4.     o ← crossover (p1, p2)
5.     Com probabilidade γ_educ → educar(o)
6.     se o é inviável então
7.        Inserir o em Pu
8.        Com probabilidade γ_rep → reparar(o)
9.     fim-se
10.    se o é viável então
11.       Inserir o em Pf
12.    fim-se
13.    se |Pf| = μ + λ então
14.       Selecionar sobreviventes em Pf
15.    fim-se
16.    se |Pu| = μ + λ então
17.       Selecionar sobreviventes em Pu
18.    fim-se
19.    Ajustar os pesos ω1, ω2 e ω3
20.    se melhor solução não melhorou por It_div iterações então
21.       Aplicar diversificação
22.    fim-se
23. fim-enquanto
24. Retornar a melhor solução viável
```

Figura 3 - Pseudocódigo do HGSADC.
Fonte: Adaptado de Vidal et al. (2012).

Em que:

Pf = vetor de soluções viáveis.

Pu = vetor de soluções inviáveis.

It_{max} = número máximo de iterações sem melhora.

T_{max} = tempo máximo de execução.

It_{div} = número de iterações para aplicar a diversificação.

It_{adjust} = número de iterações para aplicar os ajustes de peso.

γ_{educ} = taxa de educação.

γ_{rep} = taxa de reparação.

γ_{elite} = define um conjunto de soluções.

γ_{close} = taxa que define o tamanho da vizinhança.

ξ^{ref} = proporção de referência para soluções viáveis.

μ = tamanho das populações

λ = número de filhos em uma geração.

ω_1 = peso para penalização de adjacência

ω_2 = peso para penalização de pousio.

ω_3 = peso para penalização de adubação verde.

4. TESTES COMPUTACIONAIS

Com finalidade de analisar a performance do método proposto para a resolução do PRC-A, foram executados experimentos computacionais utilizando três diferentes instâncias, com 10, 15 e 20 lotes, respectivamente, como ilustrado na Figura 4.

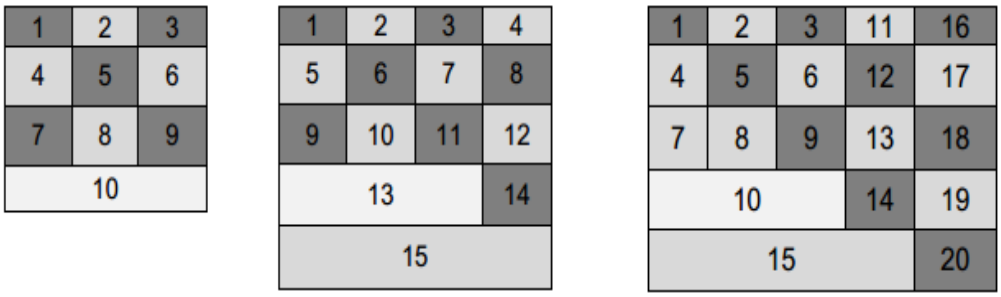

Figura 4 - Relação de adjacência entre lotes de cada instância.
Fonte: Aliano Filho (2012).

As instâncias citadas são provenientes do trabalho de Aliano Filho (2012), sendo que todas as instâncias consideram 29 culturas diferentes de plantio em 12 meses de programação. Dessas 29 culturas, 25 são comercias e 4 reservadas para adubação verde. As culturas são ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Culturas disponíveis para o plantio.
Fonte: Aliano Filho (2012).

Id	Cultura	Familia	Época de Plantio		Ciclo de vida (mês)	Lucratividade (R$)
			Inicio	Fim		
1	Alface	Compositae	Ano todo		2	300
2	Almeirão	Compositae	Ano todo		4	150
3	Couve	Brassicaceae	Março	Junho	3	300
4	Brócolis	Brassicaceae	Fevereiro	Junho	7	400
5	Repolho	Brassicaceae	Fevereiro	Junho	4	400
6	Couve-Flor	Brassicaceae	Março	Junho	4	900
7	Beterraba	Chenopodiaceae	Março	Julho	2	810
8	Espinafre	Chenopodiaceae	Fevereiro	Julho	2	600
9	Abobrinha	Cucurbitaceae	Agosto	Março	4	400
10	Moranga	Cucurbitaceae	Setembro	Janeiro	5	200
11	Pepino	Cucurbitaceae	Ano todo		4	450
12	Melancia	Cucurbitaceae	Agosto	Outubro	3	900
13	Alho	Liliaceae	Março	Abril	6	810
14	Cebola	Liliaceae	Março	Junho	4	430
15	Quiabo	Malvaceae	Agosto	Março	7	710
16	Milho	Gramineae	Agosto	Abril	3	350
17	Aveia	Gramineae	Março	Maio	6	350
18	Tomate	Solanaceae	Ano todo		5	810

19	Pimentão	Solanaceae	Ano todo		5	550
20	Batata	Solanaceae	Agosto	Outubro	3	240
21	Cenoura	Umbelliferae	Março	Julho	4	620
22	Salsinha	Umbelliferae	Setembro	Março	6	400
23	Feijão-Vagem	Leguminosae	Agosto	Abril	4	750
24	Ervilha	Leguminosae	Março	Abril	3	830
25	Feijão	Leguminosae	Agosto	Setembro	3	720
26	Crotalália	Leguminosae	Setembro	Dezembro	3	-
27	Feijão-de-Porco	Leguminosae	Setembro	Dezembro	3	-
28	Mucuna	Leguminosae	Setembro	Janeiro	3	-
29	Ervilha Peluda	Leguminosae	Março	Junho	4	-
30	Pousio	-	Ano todo		1	-

A Tabela 2 exibe o tamanho (área) em hectares (ha) de cada lote utilizado nas instâncias citadas na Figura 4.

Tabela 2 - Área (em ha) dos lotes (ALIANO FILHO, 2012).

Lote	Area	Lote	Area
1	1,5	11	2
2	2	12	3
3	2	13	4
4	2,25	14	3
5	3	15	5,5
6	3	16	2,5
7	3	17	3,75
8	4	18	5
9	4	19	3,75
10	8,25	20	2,5

Com esses dados, o HGSADC foi executado 100 vezes para cada instância com o objetivo de capturar informações para efeito avaliativo. As informações são as seguintes:

- Melhor função objetivo (MFO): o valor da melhor solução encontrada dentre as 100 execuções da meta-heurística.

- FO média (MED): média aritmética das melhores FOs encontradas nas 100 execuções da meta-heurística.

- Desvio (D): que é calculado da seguinte forma:

$$D = (((MFO - MED/MFO) * 100)$$

- Tempo médio (TM): a média aritmética dos tempos computacionais para encontrar a melhor solução em cada execução da meta-heurística (em segundos).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo, os resultados provenientes dos testes computacionais utilizando o algoritmo HGSADC serão apresentados e comparados com os demais métodos que estão disponíveis na literatura.

5.1. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Utilizando a instância de 10 lotes, foram testadas diversas combinações de parâmetros, afim de encontrar os valores que resultaram nas melhores soluções. Tais parâmetros foram definidos empiricamente e ajustados conforme os resultados apresentavam melhoras. A combinação de parâmetros e seus respectivos valores estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados pelo HGSADC.

Parâmetros	Valor
It_{max}	130000
T_{max}	300
It_{div}	100
γ_{educ}	1,0
γ_{rep}	0,5
γ_{close}	0,2
γ_{elite}	0,4
μ	35
λ	50
ξ^{ref}	0,2
It_{adjust}	100

Com os parâmetros calibrados, o HGSADC foi executado por 100 vezes para cada instância, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos por meio de 100 execuções do HGSADC.

Instância	Melhor Solução (R$)	Solução Média (R$)	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
10 Lotes	89660,00	85887,50	4,20	168,00
15 Lotes	137107,50	129615,00	5,46	188,50
20 Lotes	181400,00	171580,00	5,41	214,00

As Figuras 5, 6 e 7 demostram, respectivamente, as melhores programações de plantio obtidas pelo HGSADC para as três instâncias do PRC-A (10, 15 e 20 lotes). Nas figuras a seguir, os números representam as culturas listadas na Tabela 1 (coluna id.) e as cores iguais equivalem às culturas de mesma família botânica.

	Ano 1											
Lote/Mês	Jan.	Fev.	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	1	24	24	24	6	6	6	6	1	1	30
2	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23	23
3	1	1	24	24	24	6	6	6	6	1	1	30
4	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23	23
5	1	1	24	24	24	6	6	6	6	1	1	30
6	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23	23
7	1	1	24	24	24	6	6	6	6	1	1	30
8	16	18	18	18	18	18	30	25	25	25	16	16
9	1	1	24	24	24	6	6	6	6	1	1	30
10	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23	23

Figura 5 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 10 lotes.

	Ano 1											
Lote/Mês	Jan.	Fev.	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
2	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
3	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
4	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
5	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
6	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
7	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
8	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
9	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
10	16	16	6	6	6	6	30	23	23	23	23	16
11	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
12	1	8	8	24	24	24	30	23	23	23	23	1
13	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
14	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
15	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23

Figura 6 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 15 lotes.

	Ano 1											
Lote/Mês	Jan.	Fev.	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
2	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
3	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
4	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
5	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
6	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
7	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
8	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
9	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
10	23	23	23	6	6	6	6	16	16	16	30	23
11	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
12	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
13	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
14	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
15	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
16	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
17	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
18	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18
19	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
20	18	18	18	18	7	7	30	23	23	23	23	18

Figura 7 - Melhor programação de plantio – HGSADC – 20 lotes.

5.2. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre as FOs médias das soluções obtidas com a meta-heurística HGSADC para cada instância com múltiplos métodos propostos por Aliano Filho (2012), Araújo e Mauri (2013), Mateveli (2014) e por Decothé (2016). Constata-se que o método desenvolvido neste trabalho obteve melhora significativa quando comparado à média da lucratividade apresentada no trabalho de Aliano Filho (2012), Araújo e Mauri (2013) e Mateveli (2014). Em relação a meta-heurística ALNS implementada por Decothé (2016), os resultados obtidos nesse trabalho ficaram inferiores em apenas 1%, em contrapartida, o tempo médio para encontrar as soluções foi 60% inferior.

Tabela 5 - Comparação das soluções do HGSADC com outros métodos da literatura.

Método	**Instâncias**			**Total**	**Melhora (%)**
	10 lotes	**15 lotes**	**20 lotes**		
HGSADC	89660,00	137107,50	181400,00	408167,50	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	55022,00	74910,00	90590,00	220522,00	46%
SA	68304,00	101200,00	128890,00	298394,00	27%
AM	55369,00	86916,00	119140,00	261425,00	36%
AG+SA	66985,00	91796,00	136708,00	295489,00	28%
Método proposto por Araújo e Mauri (2013)					
CS	78149,40	118457,90	168048,33	364655,63	11%
Métodos propostos por Matelevi (2014)					
AG	83347,50	127550,00	171637,50	382535,00	6%
AM	83397,50	125265,00	168286,25	376948,75	8%
Método proposto por Decothé (2016)					
ALNS	91151,60	137818,85	184511,46	413481,91	-1%

O HGSADC foi executado por 100 vezes para cada uma das três instâncias do PRC-A, durante um intervalo de tempo de 300 segundos. Desta forma, foi utilizado para comparação o tempo médio para encontrar a melhor solução. Vale ressaltar que, no trabalho do Decothé (2016), o intervalo de tempo utilizado para os testes computacionais foi de 500 segundos. O tempo médio para encontrar a melhor solução, para cada método e instância, é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação dos tempos computacionais médios atingidos.

Método	**Tempo computacional (seg.)**			**Tempo médio (seg.)**	**Melhora (%)**
	10 lotes	**15 lotes**	**20 lotes**		
HGSADC	168,00	188,50	214,00	190,17	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	19,50	36,20	56,30	37,33	-80%
SA	49,34	104,26	181,16	111,58	-41%
AM	4,13	9,71	22,62	12,15	-94%
AG+SA	6,38	10,65	13,67	10,23	-95%
Método proposto por Araújo e Mauri (2013)					
CS	8,35	12,53	15,71	12,19	-94%
Métodos propostos por Matelevi (2014)					
AG	23,39	63,35	110,59	65,78	-65%
AM	177,03	250,95	276,23	234,74	23%
Método proposto por Decothé (2016)					
ALNS	270,05	301,21	343,80	305,02	60%

Todos os experimentos foram realizados utilizando a linguagem de programação C++ em um computador de processador Intel Core I5 2.60GHz com 8GB de memória RAM e rodando o sistema operacional Windows 7. Da mesma forma que o trabalho do Decothé (2016).

Os experimentos do trabalho de Matelevi (2014) foram executados utilizando a mesma linguagem de programação, entretanto utilizando um computador com processador Intel Core I5 2.67GHz com 8GB de memória RAM. Já os experimentos computacionais realizados por Aliano Filho (2012) foram realizados com o *software* Matlab versão 7.4.0 R2007a em um computador com processador Core 2 Quad com 2GB de memória RAM.

Por fim, no trabalho de Araújo e Mauri (2013), os testes também foram executados na linguagem de programação C++, porém em um computador com processador Intel Core I5 2,67GHz com 4GB de memória RAM.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A), apresentado por Aliano Filho (2012), que é um problema complexo de otimização combinatória, pois envolve um número considerável de restrições e culturas com diversas características.

Para a resolução do problema foi utilizada a meta-heurística *Hybrid Genetic Search with Advanced Diversity Control* (HGSADC), a qual ainda não havia sido analisada para resolução do PRC-A.

Os resultados obtidos pela HGSADC para as 3 instâncias do PRC-A foram satisfatórios, encontrando soluções melhores que as exibidas no trabalho de Aliano Filho (2012), Araújo e Mauri (2013) e Mateveli (2014). Porém, os resultados alcançados por Decothé (2016) foram superiores, apesar do método proposto pelo autor utilizar 60% a mais no tempo para encontrar a melhor solução.

A HGSADC se mostrou uma ótima alternativa para a resolução do PRC-A, obtendo resultados expressivos. Em trabalhos futuros, a implementação da função educar de forma mais refinada, usando menos aleatoriedade e mais gulosidade na hora da troca das culturas para obter um aumento da FO podem ser explorados. Outro fator a ser explorado do HGSADC seria o aumento do tempo de execução do algoritmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIANO FILHO, A. *Metaheurísticas em um problema de rotação de culturas*. 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2013.

ALTIERI, M. A. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. Porto Alegre: Agropecuária, 2002.

ARAÚJO, D. L.; MAURI, G. R. Clustering search para resolução de um problema de rotação de culturas com restrições de adjacências. *In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 45, 2013, Natal. Anais... SBPO, 2013.

ARF, O.; SILVA, L. S.; BUZETTI, S; ALVES, M. C.; SÁ, M. E.; RODRIGUES, R. A. F.; HERNANDEZ. F. B. T. Efeito da rotação de culturas, adubação verde e nitrogenada sobre o rendimento do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 11, p. 2029-2036, 1999.

COSTA, A. M.; SANTOS, L. M. R.; ALEM, D. J.; SANTOS, R. H. S. Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, v. 219, p. 265-283, 2014.

DECOTHÉ, D. R. Adaptive large neighborhood search para resolução de um problema de rotação de culturas com restrições de adjacências. Trabalho de Conclusão de Curso (*Bacharelado em Sistemas de Informação*) – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, 2016.

GLIESSMAN, S. R. *Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável*. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 653 p.

HAMMING, R. W. Error detecting and error correcting codes. Bell System Technical Journal, v. 26, p. 147-160, 1950.

LEMALADE, J. L.; NAGIH, A.; PLATEAU, G. A MIP flow model for crop-rotation planning in a context of forest sustainable development. *Annals of Operations Research*, v. 190, p. 149-164, 2011.

MATEVELI, G. V. Algoritmos evolutivos para resolução de um problema de rotação de culturas com restrições de adjacências. Trabalho de Conclusão de Curso (*Bacharelado em Sistemas de Informação*) – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, 2014.

SANTOS, L. M. R.; SANTOS, R. H.; ARENALES, M. N.; RAGGI, L. A. Um modelo para a programação de rotações de culturas. *Pesquisa Operacional*, v.27, n. 3, p. 535-547, 2007.

SANTOS, L. M. R.; MICHELON, P.; ARENALES, M. N.; SANTOS, R. H. S. Crop rotation scheduling with adjacency constraints. *Annals of Operations Research*, v. 190, p. 165-180, 2011.

SANTOS, I. C.; SEDIYAMA, M. A. N.; PEDROSA, M. W. Adubação verde no cultivo de hortaliças. *Circular técnica*, Belo Horizonte, n. 179, 2013. Disponível em: <www.epamig.br>. Acesso em: 01 jun. 2016.

SEDIYAMA, M. A. N.; SANTOS, I. C.; LIMA, P. C. Growing vegetables in the organic system. Ceres, Viçosa, v. 61, supl. p. 829-837, 2014.

VIDAL, T.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; LAHRICHI, N.; REI, W. A hybrid genetic algorithm for multi-depot and periodic vehicle routing problems. *Operations*

Research, v. 60, p. 611-624, 2012.

RODRIGO TORRES SEARES

ALGORITMO EVOLUTIVO PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Aprovado em 15 de dezembro de 2017.

BANCADA EXAMINADORA

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. MSc. Valeria Alves da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. MSc. Dayan de Castro Bissoli
Universidade Federal do Espírito Santo