

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO**

DIEGO LUCINDO DE ARAÚJO

**CLUSTERING SEARCH PARA RESOLUÇÃO DO
PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS**

ALEGRE - ES

2014

DIEGO LUCINDO DE ARAÚJO

**CLUSTERING SEARCH PARA RESOLUÇÃO DO
PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

ALEGRE - ES

2014

DIEGO LUCINDO DE ARAÚJO

**CLUSTERING SEARCH PARA RESOLUÇÃO DO
PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS**

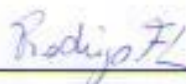
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovado em 08 de dezembro de 2014.

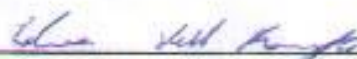
COMISSÃO EXAMIDADORA



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



Prof. M.Sc. Rodrigo Freitas Silva
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. M.Sc. Edmar Hell Kampke
Universidade Federal do Espírito Santo

A meus pais, irmãos e amigos que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar saúde e força para superar as dificuldades.

A toda minha família, especialmente meus pais Carlos e Maria Helena, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu sobrinho Vinícius que com apenas 9 anos de idade me ensinou muito sobre a vida.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que me deram a oportunidade de vislumbrar um horizonte superior e vivenciar um ambiente amigável e criativo.

A todas amigadas construídas durante a graduação e que de alguma maneira contribuíram para o meu crescimento pessoal.

A empresa júnior Click Júnior, pela oportunidade de desenvolvimento do meu lado empreendedor.

Ao professor Geraldo Regis Mauri, pela orientação desde o projeto de iniciação científica até este trabalho de conclusão de curso.

A Izabela Moreira, por ter me incentivado a realizar um curso superior e por todo companheirismo, amor e carinho vividos ao longo de 7 anos.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova alternativa para a resolução do Problema de Rotação de Culturas (PRC). O PRC consiste em alternar culturas por um período determinado de tempo em uma área de plantio dividida em lotes, com o objetivo de encontrar uma programação de plantio que maximize o lucro da produção, respeitando todas as restrições impostas. Dentre essas restrições, pode-se considerar um tempo para descanso e recuperação do solo, o não cultivo consecutivo de plantas da mesma família botânica, a época de semeadura de cada cultura, etc. A ideia central consiste na aplicação da meta-heurística *Clustering Search* (CS) utilizando duas heurísticas diferentes como geradoras de soluções a fim de se obter uma nova alternativa para resolução do PRC que considere um conjunto de restrições de adjacências. Para avaliação do desempenho da CS, foram realizados experimentos computacionais considerando um conjunto de instâncias utilizado em outro trabalho recente encontrado na literatura. Foi possível demonstrar, com os resultados obtidos, a eficiência da CS. Por fim, foi realizado um comparativo entre as duas versões propostas e com os demais métodos encontrados na literatura para resolução do PRC.

Palavras-chave: *Clustering Search*; Problema de Rotação de Culturas; Meta-heurística Híbrida.

CLUSTERING SEARCH FOR SOLVING A CROP ROTATION PROBLEM

ABSTRACT

This research aims to present a new alternative to solve the Crop Rotation Problem (CRP). The CRP consists of alternating crops in a given period of time in a plantation area divided into lots in order to find a planting schedule that maximizes the profits of production ensuring the attendance of several restrictions. Among these constraints, it can be considered the time for soil to rest and recovery, the non-consecutive cultivation of plants from the same botanical family, the sowing period of each crop, etc. The main idea is based on applying the Clustering Search (CS) metaheuristic using two different heuristics for generating solutions looking for new alternatives for solving the CRP considering a set of adjacency constraints. To evaluate the performance of CS, computational experiments were performed considering a set of instances used in other recent work found in the literature. The CS results are able to demonstrate the efficiency of the proposed CS, and a comparison between our two proposed versions was also performed with other methods reported in the literature for solving the PRC.

Keywords: Clustering Search; Crop Rotation Problem; Hybrid Metaheuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de área de plantio dividida em lotes para a policultura.	13
Figura 2 - Fluxograma da CS (CHAVES; LORENA, 2010)	23
Figura 3 - Pseudocódigo da CS com SA.	24
Figura 4 - Pseudocódigo da CS com GRASP.	26
Figura 5 - Exemplo de cálculo da distância de Hamming (CHAVES, 2009).....	27
Figura 6 - Relação de adjacência entre os lotes para cada instância (ALIANO FILHO, 2012).	30
Figura 7 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 10 lotes.	32
Figura 8 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 15 lotes.	33
Figura 9 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 20 lotes.	33
Figura 10 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 10 lotes.....	34
Figura 11 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 15 lotes.....	34
Figura 12 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 20 lotes.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Culturas disponíveis para o plantio (ALIANO FILHO, 2012).	29
Tabela 2 - Área (em ha) dos lotes (ALIANO FILHO, 2012).	30
Tabela 3 - Valores dos parâmetros do CS+GRASP após a calibração.....	31
Tabela 4 - Valores dos parâmetros da CS+SA após a calibração.	31
Tabela 5 - Resultados obtidos por meio de 100 execuções do CS+GRASP proposto.	32
Tabela 6 - Resultados obtidos por meio de 100 execuções da CS+SA proposta.	32
Tabela 7 - Comparação das soluções da CS+GRASP com outros métodos da literatura.	35
Tabela 8 - Comparação das soluções da CS+SA com outros métodos da literatura.	35
Tabela 9 - Comparação dos tempos computacionais médios obtidos.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG – Algoritmo Genético

AM – Algoritmo Memético

CS – *Clustering Search*

ECS – *Evolutionary Clustering Search*

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

OC – Otimização Combinatória

PRC – Problema de Rotação de Culturas

PRC-A – Problema de Rotação de Culturas com Restrição de Adjacências

PRC-D – Problema de Rotação de Culturas com Atendimento a Demanda

PRC-E – Problema de Rotação de Culturas com Estocagem

SA – *Simulated Annealing*

Ha – Hectares

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	18
4 METODOLOGIA	22
4.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DA CS.....	23
4.1.1 Gerador de soluções.....	23
4.1.2 Agrupamento iterativo.....	27
4.1.3 Analisador de Agrupamentos.....	27
4.1.4 Busca Local	28
4.1.5 Função objetivo	28
4.2 TESTES COMPUTACIONAIS	29
5 RESULTADOS	31
5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA	35
6 CONCLUSÕES	37
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

Problemas de otimização têm em sua forma geral o objetivo de maximizar ou minimizar uma função definida sobre um certo domínio. Em Problemas de Otimização Combinatória (OC) o domínio é tipicamente finito. Um elemento deste domínio pode ser facilmente testado, porém, testar todos os elementos possíveis à procura do melhor elemento torna-se uma prática inviável mesmo para instâncias de tamanho moderado. Esses problemas são encontrados em diversas áreas e estão presentes em atividades do nosso cotidiano, como a elaboração de mapas cartográficos, corte de placas, roteamento de veículos, rotação de culturas, entre outros. Problemas de OC são em grande parte difíceis de obter soluções ótimas ou até mesmo aproximadas em um tempo hábil. Para alguns desses problemas, encontrar soluções viáveis de forma manual é uma tarefa exaustiva e impraticável.

1.1 O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA

A produção agrícola predominante no Brasil é baseada principalmente na monocultura ou na sucessão entre duas culturas, como exemplo, trigo e soja, devido a sua fácil implantação e o seu reduzido custo de produção. Porém, como desvantagens da monocultura temos uma série de consequências de impacto ambiental, tais como o uso de pesticidas tóxicos que são altamente prejudiciais ao meio ambiente, além de facilitar a ação e prevalência de pragas e patógenos. A exaustão do solo também é uma consequência gerada da monocultura, implicando assim em uma dosagem de adubos químicos cada vez maiores (ALTIERI, 2002).

Em uma policultura sustentável, estes problemas podem ser evitados, considerando conjuntamente o uso correto de defensivos agrícolas, o controle de pragas, a preservação ambiental de plantio e os ganhos econômicos. A Figura 1 ilustra a divisão de uma área de produção em diversos lotes de tamanhos variados para a implantação de uma policultura.

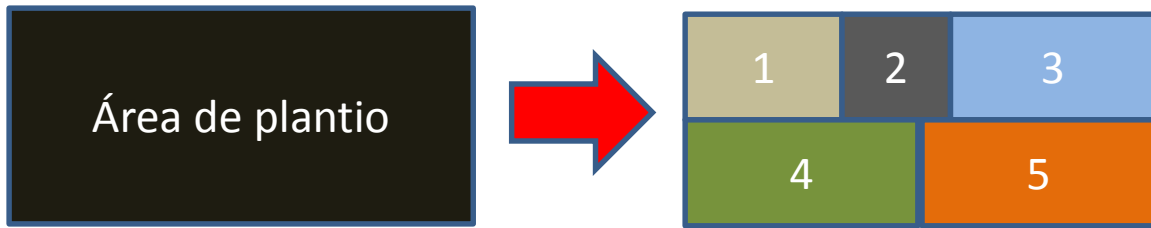


Figura 1 - Exemplo de área de plantio dividida em lotes para a policultura.

A rotação de culturas quando aplicada de modo correto, por um período razoavelmente longo, acaba por melhorar as características químicas, físicas e biológicas do solo, repõe matéria orgânica ao solo, além de proteger da erosão e dos ataques dos agentes climáticos e de oferecer uma diversificada produção alimentícia (ALTIERI, 2002; ARF et al., 1999; GLIESSMAN, 2000).

Nesse contexto, o PRC (SANTOS, 2009) tem sido objeto de estudo nas áreas agrônomicas e ecológicas, devido a uma grande variedade de benefícios, além da diversificada produção de alimentos e dos ganhos econômicos. A ideia básica consiste em alternar, em um período de tempo definido previamente, diferentes famílias botânicas de vegetais numa mesma área agrícola, sendo que as espécies devem ser escolhidas em função das necessidades da propriedade e de fatores que tornem a produção mais sustentável, tais como o propósito comercial da cultura, de forma a aumentar a fonte de renda do agricultor, e a recuperação do solo, para realizar a reciclagem de nutrientes.

Assim, de uma forma geral, algumas restrições de cultivo propostas por Arf et al. (1999), Altieri (2002) e Gliessman (2000) devem ser consideradas:

1. Lotes adjacentes não podem cultivar culturas de mesma família botânica simultaneamente;
2. Uma mesma família botânica de plantas não pode ser cultivada consecutivamente em um mesmo lote;
3. Cultivo de plantas leguminosas, durante o período de rotação, para realizar a fixação de nitrogênio ao solo (Adubação Verde);
4. Descanso do solo ou período de pousio para recuperação do solo;
5. Cultivar as culturas respeitando os ciclos de vida e os períodos de plantio referentes a cada cultura.

Alguns trabalhos como Alfandari et al. (2011) e Santos et al. (2011) descrevem a complexidade dos problemas de rotação de culturas devido às características das variáveis envolvidas e ao elevado número de restrições a serem respeitadas. Diversas abordagens podem ser aplicadas ao PRC, algumas delas são apresentadas por Santos et al. (2010) e Costa et al. (2011), que consideram, por exemplo, a demanda e a estocagem da colheita, respectivamente.

A seleção de espécies baseia-se na diversidade botânica. Plantas de diferentes famílias botânicas e de necessidades nutricionais variadas, cultivadas de forma distribuída nos diversos lotes, podem interromper ação de pragas e doenças, além de aumentar a estabilidade da produção diante dos impactos ambientais. Já a alternância entre diferentes espécies botânicas em uma mesma área reduz o empobrecimento do solo, garantindo um melhor aproveitamento dos nutrientes naturais da terra.

Uma maior quantidade de matéria orgânica no solo e a fixação de nitrogênio na terra são obtidas através do cultivo de leguminosas. Além de vários outros benefícios, esse processo de fertilização natural evita a erosão do solo, mantém a umidade, controla a variação térmica e protege o solo da intensidade da luz solar. No descanso do solo ou pousio, é deixado crescer livremente a vegetação por certo período de tempo, com o intuito de recuperar a estrutura do solo. Para que as culturas sejam plantadas e colhidas na época certa, é necessário que a sua época de plantio e ciclo de vida sejam rigorosamente respeitados durante a programação da rotação.

1.2 OBJETIVOS

A seguir são descritos 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 híbrida CS combinando diferentes heurísticas geradoras de soluções ao PRC, ou seja, apresentar uma alternativa para a resolução do problema em questão. Ao final, realizar um comparativo de resultados entre os métodos propostos e os já existentes na literatura.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver as adaptações necessárias para modelagem do PRC;
- b) Implementar a CS utilizando diferentes heurística como geradoras de soluções: *Simulated Annealing (SA)* e *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)*;
- c) Aplicar os métodos propostos às principais instâncias (problemas teste) encontradas na literatura;
- d) Avaliar o desempenho dos métodos por meio de experimentos computacionais comparados a outros trabalhos e/ou métodos existentes na literatura.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais e mais recentes trabalhos sobre o PRC. O Capítulo 3 descreve uma modelagem matemática para o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A), proposta por Aliano Filho (2012). A metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho é apresentada em detalhes no Capítulo 4, e os resultados obtidos são descritos no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

É possível observar na literatura alguns trabalhos sobre o Problema de Rotação de Culturas (PRC) e sua aplicabilidade em diferentes abordagens. A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica em ordem cronológica e as abordagens utilizadas nos principais e mais recentes trabalhos sobre este problema.

Santos et al. (2007) apresentaram um dos principais trabalhos referente ao PRC, no qual um modelo de otimização binário foi proposto para resolução do problema. As instâncias utilizadas representavam dados reais de 28 culturas, com diferentes famílias, ciclo e época de plantio. O modelo proposto foi resolvido pelo solver CPLEX 7.5 com instâncias de 1 a 10 lotes.

Santos et al. (2009) apresenta uma abordagem para o PRC focada na produção de base sustentável de hortaliças: o PRC-A. O objetivo consiste na maximização da ocupação das áreas produtivas em que as restrições de plantio são estendidas às áreas adjacentes. Como a modelagem matemática do PRC-A possui, em geral, um número muito grande de variáveis e restrições, com matriz de restrições esparsa e bloco-diagonal, o modelo foi reformulado com a Decomposição de *Dantzig-Wolfe*, o que permitiu sua resolução por procedimentos baseados em geração de colunas, heurísticos e exatos. Todos os algoritmos foram implementados na linguagem C++ e os modelos lineares inteiros foram resolvidos no CPLEX 11.1 considerando 28 culturas com 4, 8, 12, 16 e 20 lotes

Outra variação é o PRC-D abordado por Santos et al. (2010), no qual o objetivo consiste em suprir a demanda de um conjunto de culturas tendo-se disponível um conjunto de áreas heterogêneas. O problema foi formulado com um modelo de otimização linear, em que cada variável está associada a uma programação de rotação de culturas. Esse modelo contém um alto número de programações de rotação e é resolvido por geração de colunas.

Uma extensão do PRC-D é o PRC-E abordado por Costa et al. (2011). Nesse caso, o atendimento da demanda não é mais necessariamente realizado pelos produtos recém colhidos. A demanda poderá ser atendida por meio dos produtos que estiverem no estoque. O estoque deve ser realizado por um período limitado de tempo e ainda assim com algumas perdas, pois os produtos colhidos são perecíveis.

Foi proposto um modelo linear inteiro misto que faz uso de variáveis com dependência temporal. Os autores descrevem um método de geração de colunas e analisam os ganhos obtidos devido à presença dos estoques.

Por fim, um trabalho realizado por Aliano Filho (2012) demonstrou a eficiência de métodos heurísticos para solucionar o PRC-A e o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências e Demanda (PRC-A-D). Nesses dois problemas, foram utilizados um Algoritmo Genético (AG), um *Simulated Annealing* (SA) e duas abordagens híbridas, sendo elas: um Algoritmo Genético com *Simulated Annealing* e um Algoritmo Memético (AM). O objetivo considerado pelo autor consiste em maximizar a lucratividade e os resultados encontrados foram satisfatórios demonstrando a eficiência dos métodos utilizados. Esse trabalho foi utilizado como base de comparação nesta pesquisa.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção, é descrita a formulação matemática proposta por Aliano Filho (2012), que é utilizada como base neste trabalho para representação do PRC-A.

Adotando uma estratégia de dividir uma quantidade T de anos de uma rotação de culturas em M períodos de tamanhos iguais, com uma unidade de tempo estabelecida (dia, semana, quinzena, mês, bimestre, etc.), é possível definir uma programação de rotação de culturas como sendo um calendário de plantio e cultivo das culturas previamente selecionadas para a rotação.

A programação de rotação consiste em estabelecer quais culturas deverão ser plantadas e exatamente em qual período da rotação, e os lotes onde estas culturas deverão ser cultivadas. Pode-se representar a área de cultivo dividida em lotes como sendo um grafo bidirecional $G(V,A)$, no qual V é o conjunto dos vértices que representam os lotes e A é o conjunto de arestas, de modo que o par $(u,v) \in A$, se e somente, se os lotes u e v são adjacentes.

Entre os possíveis critérios, algumas restrições técnicas e de base sustentável foram seguidas no plano de rotação de culturas. Essas restrições são descritas a seguir:

- a) *Plantio Consecutivo* – culturas de uma mesma família botânica não podem ser cultivadas consecutivamente em um mesmo lote.
- b) *Época de Plantio* – a época de plantio e o ciclo de vida (intervalo de tempo do plantio até o momento da colheita) de cada cultura devem ser respeitados.
- c) *Áreas Adjacentes* – lotes adjacentes não podem cultivar culturas de uma mesma família botânica em um mesmo período simultâneo de tempo.
- d) *Adubação Verde* – pelo menos uma cultura leguminosa responsável por fazer a adubação verde deverá ser plantada em cada lote durante o período de programação e deverá cumprir as restrições (a), (b) e (c).
- e) *Pousio* – é necessário estabelecer pelo menos um período de descanso do solo para cada lote da programação de rotação com o objetivo de recuperar os nutrientes naturais da terra.

Alguns parâmetros e variáveis foram considerados para descrever o conjunto de programações de rotações de culturas que respeitem as restrições, a saber:

- M – número de períodos de mesma duração (unidade de tempo pré-estabelecida) da rotação;
- N_f – número de famílias de plantas botânicas;
- N – número de culturas pertencentes à N_f famílias botânicas;
- F_p – conjunto de culturas da família botânica p , tal que $p = 1, \dots, N_f$;
- L – quantidade de lotes para plantio das culturas;
- C – conjunto de culturas que possuem fins comerciais e poderão ser selecionadas para a rotação, excluindo as culturas de adubação verde;
- A – conjunto de culturas que podem ser alocadas para adubação verde (leguminosas);
- t_i – ciclo de vida da cultura i , incluindo os períodos estimados de preparação do solo e colheita;
- $I_i = [C_i, T_i]$ – intervalo de semeadura da cultura i , tal que C_i é o período mais cedo em que a cultura i pode ser plantada e T_i é o período mais tarde;
- l_i – lucratividade (R\$/ha) da cultura i nos t_i períodos;
- T – duração da programação da rotação de culturas, igual para todos os lotes;
- $area_k$ – área do lote k em hectares (ha);
- S_k – conjunto dos lotes adjacentes ao lote k .

Para simplificar no tratamento dos dados, o pousio é considerado como sendo a cultura indicada por $n = N + 1$. A variável decisória x_{ijk} é binária e é representada da seguinte forma: $x_{ijk} = 1$ se a cultura i é plantada no período j no lote k , e 0 caso contrário, para $i = 1, \dots, N+1$, $j \in I_i$ e $k = 1, \dots, L$.

A formulação matemática para maximizar a lucratividade da produção, a fim de atender todas as restrições impostas, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} \sum_{k=1}^L area_k l_i x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in F_p} \sum_{r=0}^{t_i-1} \sum_{v \in S_k} x_{i(j-r)v} \leq L \left(1 - \sum_{i \in F_p} x_{ijk} \right), p = 1, \dots, N_f, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F_p} \sum_{r=0}^{t_i} x_{i(j-r)k} \leq 1, p = 1..N_f, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sum_{r=0}^{t_i-1} x_{i(j-r)k} \leq 1, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{njk} \geq 1, k = 1, \dots, L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j=1}^M x_{ijk} \geq 1, k = 1, \dots, L \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, N + 1, j \in I_i, k = 1, \dots, L \quad (7)$$

A função (1) estabelece a maximização da lucratividade da rotação a ser realizada nos L lotes e nos M períodos com as culturas de propósitos comerciais pertencentes ao conjunto C .

A restrição (2) garante que culturas da mesma família botânica não sejam cultivadas em lotes adjacentes, em um período simultâneo de tempo, evitando que pragas e patógenos possam se prevalecer e expandir nas culturas. A restrição (3) impede que culturas de mesma família botânica possam ser cultivadas em períodos consecutivos em um mesmo lote, evitando o desgaste dos nutrientes do solo.

A restrição (4) garante que o ciclo de vida de uma cultura seja respeitado, ou seja, impede que duas culturas ocupem o mesmo lote em um mesmo intervalo de tempo.

A necessidade de haver pelo menos um período, de pousio em cada lote da área de plantio, durante o planejamento da rotação de culturas, objetivando o descanso do solo e a recomposição dos nutrientes naturais da terra é garantida pela restrição (5). Nessa restrição, não são levadas em consideração as restrições de plantio consecutivo e de lotes adjacentes, visto que estas são aplicadas somente às culturas pertencentes ao conjunto N . A restrição (6) se refere ao plantio de pelo

menos uma cultura leguminosa para realização da adubação verde, e a restrição (7) garante que as variáveis de decisão sejam binárias, ou seja, indicando se certa cultura i foi plantada em um determinado período de tempo j em um lote específico k da programação da rotação.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho para resolução de uma das diversas abordagens do PRC, denominada Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A), é baseada na aplicação da meta-heurística híbrida conhecida como *Clustering Search* (CS).

A *Clustering Search* – CS (OLIVEIRA; LORENA, 2007) é uma meta-heurística híbrida que surgiu após modificações realizadas com a intenção de se generalizar o algoritmo *Evolutionary Clustering Search* (ECS), proposto por Oliveira e Lorena (2004), no qual há a possibilidade de substituição do algoritmo evolutivo por outras meta-heurísticas. De uma maneira geral, a CS consiste em aplicar uma busca intensificada nas regiões supostamente promissoras, detectadas por meio de um processo de concentração de soluções.

A escolha da CS para resolução do PRC-A se dá pelo fato da mesma vir apresentando bons resultados em diversos problemas combinatoriais, uma vez que o uso de um algoritmo mais intuitivo, como o “força bruta”, levaria centenas de dias para encontrar uma resolução, tornando seu uso impraticável. Os resultados encontrados pelos autores se mostraram satisfatórios quando comparados a outros métodos encontrados na literatura.

Segundo Chaves e Lorena (2010), a CS é um método iterativo que realiza o agrupamento de novas soluções em *clusters* por meio da divisão do espaço de busca e localização de regiões supostamente promissoras. Um *cluster* pode ser definido como sendo um conjunto de três elementos $C = \{c, v, r\}$. Com isso, é possível dizer que um *cluster* i é representado pelo seu centro c_i , que marca sua localização dentro da região de busca. A variável v_i representa o volume do *cluster*, ou seja, a quantidade de soluções que foram associadas ao *cluster* i . Se v_i alcançar um valor máximo de soluções λ , significa dizer que a região do *cluster* se tornou promissora e o seu índice de ineficácia definido por r_i será analisado. O índice de ineficácia r_i atua verificando se o centro do *cluster* i está ou não sendo melhorado pela busca local. Quando a busca local é aplicada no *cluster* i não melhorando a solução, o valor de r_i é incrementado agindo como um contador para o número de vezes em que a solução não melhorou. Um parâmetro r_{max} é definido como sendo um número máximo de vezes que r_i pode alcançar. Quando r_{max} é atingido, uma perturbação é

realizada no centro do *cluster*. Aplicando essa estratégia é possível evitar que regiões que já tenham sido suficientemente exploradas pela busca local sejam consideradas novamente.

A Figura 2 ilustra o fluxograma de execução da CS e seus principais componentes são descritos a seguir.

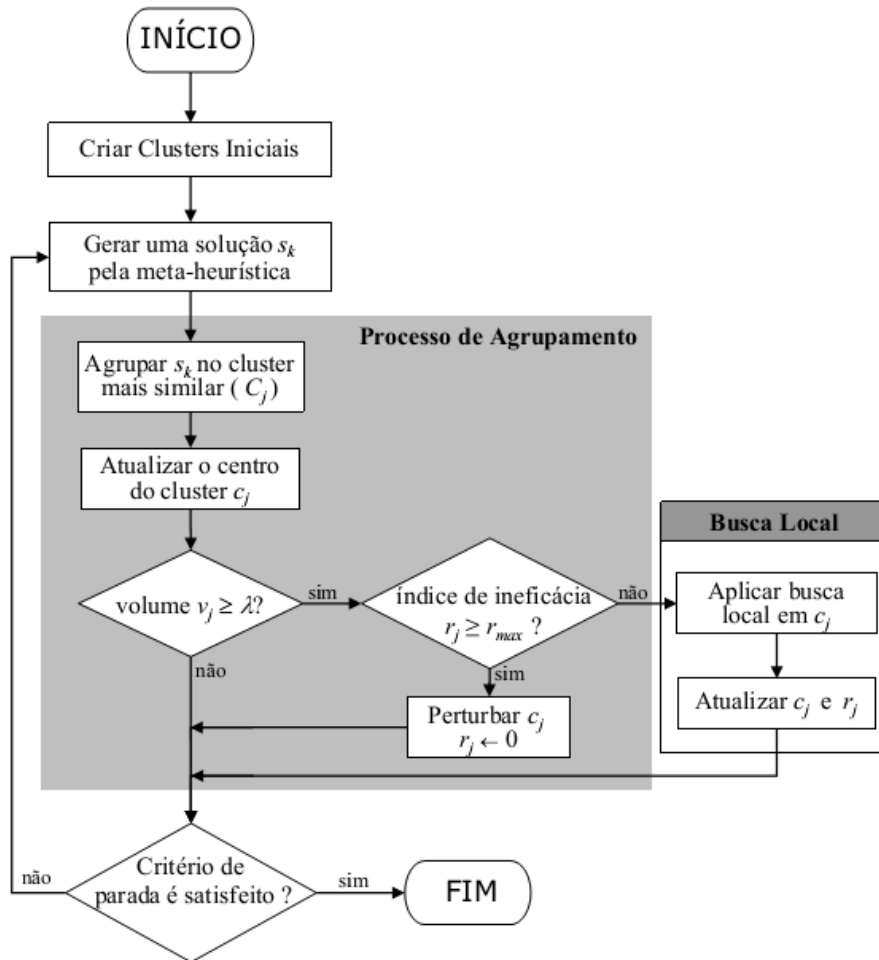


Figura 2 - Fluxograma da CS (CHAVES; LORENA, 2010)

4.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DA CS

4.1.1 Gerador de soluções

A meta-heurística geradora de soluções trabalha em tempo integral, gerando uma grande quantidade de soluções e as enviando para o processo de agrupamento da CS. Neste trabalho, um *Simulated Annealing* (SA), baseado no proposto por Mauri e Lorena (2009), e um *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) serão utilizados como geradoras de soluções.

O *Simulated Annealing* (SA) ou Recozimento Simulado, como é encontrado em alguns trabalhos da literatura, foi apresentado inicialmente por Kirkpatrick et al. (1983) como sendo uma técnica de otimização combinatória utilizada em um projeto de sistemas eletrônicos. O SA possui uma analogia ao processo físico do resfriamento de um metal em estado de fusão. Atualmente o SA continua sendo muito utilizado, tanto isoladamente como em conjunto com outras técnicas combinatoriais, como o Algoritmo Genético (AG).

O pseudocódigo da CS com o SA utilizada neste trabalho é apresentado na Figura 3.

```

1. Criar  $\gamma$  novas soluções (clusters) aleatoriamente
2.  $v_i \leftarrow 0$  e  $r_i \leftarrow 0 \forall i = 1, \dots, \gamma$ 
3.  $s \leftarrow$  solução inicial
4.  $s^* \leftarrow s$   $T \leftarrow T_0$ 
5. ENQUANTO  $T > T_c$  FAÇA
6.    $iter \leftarrow 0$ 
7.   ENQUANTO  $iter < SA_{max}$  FAÇA
8.      $iter \leftarrow iter + 1$ 
9.      $s' \leftarrow N(s)$ 
10.    SE  $f(s') > f(s)$  ENTÃO
11.       $s \leftarrow s'$ 
12.    SENÃO
13.      Com probabilidade  $e^{-(f(s)-f(s'))/T}$   $s \leftarrow s'$ 
14.    FIM-SE
15.  FIM-ENQUANTO
16.   $T \leftarrow \alpha T$ 
17.   $i \leftarrow \arg \min_{i \in \{1, \dots, \gamma\}} \{H_i\}$ 
18.   $v_i \leftarrow v_i + 1$ 
19.   $c_i \leftarrow$  melhor( $s, c_i$ )
20.  SE  $v_i = \lambda$  ENTÃO
21.     $v_i \leftarrow 0$ 
22.     $s \leftarrow$  busca local( $c_i$ )
23.    SE  $f(s) = f(c_i)$  ENTÃO
24.       $r_i \leftarrow r_i + 1$ 
25.      SE  $r_i = r_{max}$  ENTÃO
26.         $r_i \leftarrow 0$ 
27.         $c_i \leftarrow N(c_i)$ 
28.      FIM-SE
29.      SENÃO
30.         $r_i \leftarrow 0$ 
31.         $c_i \leftarrow s$ 
32.      FIM-SE
33.    FIM-SE
34.     $s^* \leftarrow \max(s^*, c_i)$ 
35.  FIM-ENQUANTO
36. Retornar  $s^*$ 

```

Figura 3 - Pseudocódigo da CS com SA.

No pseudocódigo do SA, é importante destacar a vizinhança $N(s)$, que representa a aplicação de um movimento de troca usado na tentativa de melhorar a solução. Neste trabalho, foram implementados dois movimentos de troca que são escolhidos aleatoriamente pelo método. Um dos movimentos realiza uma troca de todas as culturas pertencentes a um lote com as culturas pertencentes a outro lote, ambos escolhidos aleatoriamente. O outro movimento adotado escolhe aleatoriamente um mês e um lote da programação de plantio e remove a cultura plantada, colocando outra cultura no lugar, escolhida aleatoriamente dentre as culturas disponíveis para plantio. Essa nova cultura deve possuir uma época de plantio e um ciclo de vida compatíveis com a cultura que foi removida.

A meta-heurística GRASP, proposta por Feo e Resende (1995), é um processo iterativo no qual cada iteração consiste na fase de construção, em que uma solução viável é construída, e na fase de busca local em que é realizada uma busca a fim de encontrar um ótimo local na vizinhança da solução inicial construída. O GRASP combina as boas características de um método guloso e dos procedimentos aleatórios em sua fase de construção de soluções viáveis. A fase de construção do GRASP é também iterativa, na qual uma solução é construída elemento a elemento. A cada iteração, o próximo elemento a ser adicionado é determinado pela ordenação de todos os elementos numa lista de candidatos. Para este problema a construção se faz na escolha de culturas mais valiosas sendo cultivadas em lotes aleatórios ao longo do cronograma de maneira que nenhuma restrição seja violada.

O pseudocódigo da CS com o *GRASP* utilizada neste trabalho é apresentado na Figura 4.

```

1. Criar  $\gamma$  novas soluções (clusters) aleatoriamente
2.  $v_i \leftarrow 0$  e  $r_i \leftarrow 0 \forall i = 1, \dots, \gamma$ 
3.  $iter \leftarrow 0$ 
4.  $s \leftarrow$  solução inicial
5.  $s^* \leftarrow s$ 
6. ENQUANTO  $iter < GRASP_{max}$  FAÇA
7.    $iter \leftarrow iter + 1$ 
8.    $s'' \leftarrow$  Construção_solução()
9.    $s' \leftarrow$  Busca_Local( $s''$ )
10.  SE  $f(s') > f(s'')$  ENTÃO
11.     $s \leftarrow s'$ 
12.     $i \leftarrow \arg \min_{i \in \{1, \dots, \gamma\}} \{H_i\}$ 
13.     $v_i \leftarrow v_i + 1$ 
14.     $c_i \leftarrow$  melhor( $s, c_i$ )
15.    SE  $v_i = \lambda$  ENTÃO
16.       $v_i \leftarrow 0$ 
17.       $s \leftarrow$  busca local( $c_i$ )
18.      SE  $f(s) = f(c_i)$  ENTÃO
19.         $r_i \leftarrow r_i + 1$ 
20.        SE  $r_i = r_{max}$  ENTÃO
21.           $r_i \leftarrow 0$     $c_i \leftarrow N(c_i)$ 
22.          FIM-SE
23.          SENÃO
24.             $r_i \leftarrow 0$ 
25.            FIM-SE
26.          FIM-SE
27.           $s^* \leftarrow \max(s^*, c_i)$ 
28.        FIM-ENQUANTO
29. Retornar  $s^*$ 

```

Figura 4 - Pseudocódigo da CS com GRASP.

Neste trabalho, a fase de construção da solução do GRASP foi implementada utilizando uma abordagem gulosa, escolhendo culturas mais valiosas que atendiam a todas as restrições impostas pela modelagem do problema e mesclando com a abordagem aleatória, escolhendo lotes aleatoriamente para cultivar as culturas selecionadas. Nesta fase, é importante destacar que as soluções não devem violar nenhuma restrição imposta pela modelagem do problema. Após a fase de construção da solução, é aplicada uma busca local na solução gerada. Essa busca é feita por meio da varredura na vizinhança, na qual ocorre uma tentativa de inserir uma cultura mais valiosa no lugar da cultura atual. Esse processo é repetido para cada cultura em cada lote pertencente à programação de plantio. Caso não seja possível encontrar uma cultura mais valiosa e que não viole nenhuma restrição, a cultura atual permanece na programação.

4.1.2 Agrupamento iterativo

O processo de agrupamento iterativo consiste em alocar soluções semelhantes ao *cluster*. O centro c_i desse *cluster* é atualizado com as informações da nova solução alocada, fazendo com que o centro do *cluster* sofra um distúrbio. Neste trabalho, a partir de um número γ de *clusters*, uma nova solução s gerada pelo SA ou pelo GRASP é atribuída ao *cluster* i mais similar a solução corrente, de acordo com a distância de Hamming H_i (HAMMING, 1950) que, neste trabalho, é calculada de acordo com o número de desigualdades encontradas entre a solução s e o centro do *cluster*. Um exemplo do cálculo da distância de Hamming é apresentado na Figura 3. Concluindo este processo, a solução s é atribuída ao *cluster* i que minimiza esta distância. Para isso, é utilizada a “assimilação direta”, ou seja, caso a solução s represente uma solução melhor do que o centro do *cluster* atual (c_i), s passará a ser o novo centro do *cluster*.

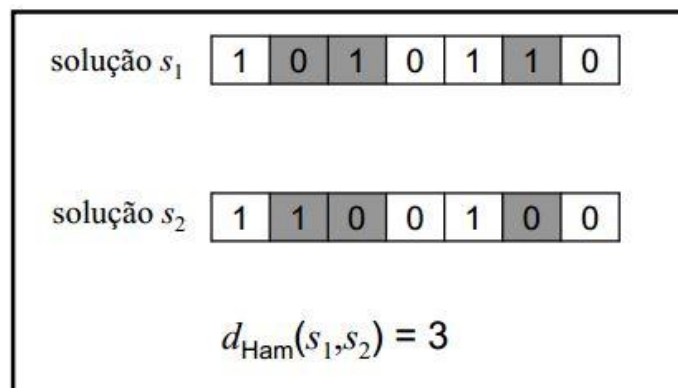


Figura 5 - Exemplo de cálculo da distância de Hamming (CHAVES, 2009).

4.1.3 Analisador de Agrupamentos

O analisador de agrupamentos tem como objetivo realizar uma análise em cada *cluster*, observando sempre se o seu volume v_i atingiu certo limitante λ estabelecido previamente. Quando λ é atingido, significa que o número de soluções assimiladas naquele *cluster* foi alto, e que este *cluster* pode estar se tornando uma região promissora, indicando então que a mesma precisa ser mais bem analisada. O analisador de agrupamentos também é responsável por gerar uma perturbação no centro dos *clusters* com baixa densidade, verificados por meio do seu índice de ineficácia, ou seja, caso a busca local seja aplicada mais de r_{max} vezes no *cluster* i

sem obter melhora, a perturbação é realizada, permitindo assim escapar de ótimos locais. Por outro lado, se $r_i < r_{max}$, a heurística de busca local é aplicada no centro c_i do *cluster* provendo a exploração de uma suposta região promissora.

4.1.4 Busca Local

Neste trabalho, a busca local é baseada na troca de cada cultura na programação de plantio, por outra cultura disponível entre todas as culturas. A escolha da cultura substituta se dá pelo fato dela ser mais lucrativa, possuir um ciclo de vida menor ou igual e uma época de plantio semelhante à cultura retirada. Esse processo é repetido enquanto uma solução melhor do que o centro do *cluster* estiver sendo obtida.

4.1.5 Função objetivo

A função objetivo visa maximizar a lucratividade da programação da rotação de culturas ao final do prazo pré-fixado. Neste trabalho, a função objetivo utilizada na CS é descrita pela Equação (8), que trata o problema de forma relaxada, utilizando pesos para penalizar a violação das restrições do modelo. Para cada restrição violada na programação de plantio, um peso no valor de p unidades é subtraído da lucratividade total obtida pela função objetivo.

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} \sum_{k=1}^L area_k l_i x_{ijk} - [(nCE + nLA + nPC + nAV + nLP + nCI) \times p] \quad (8)$$

Nessa função objetivo, nCE indica o número de culturas plantadas fora da época de plantio; nLA representa o número de lotes adjacentes que possuem culturas de mesma família botânica; nPC indica o número de vezes em que uma cultura de mesma família botânica é plantada consecutivamente em um mesmo lote; nAV indica o número de lotes que não possuem adubação verde durante o calendário de rotação; nLP denota o número de lotes que não possuem nenhum pousio durante o calendário de rotação; nCI indica o número de culturas plantadas com o ciclo de vida incorreto; e por fim, p representa o peso utilizado para “penalizar” as violações nas restrições.

4.2 TESTES COMPUTACIONAIS

Com o intuito de verificar o desempenho dos métodos propostos para a resolução do PRC-A, foram realizados experimentos computacionais utilizando três diferentes instâncias. Essas instâncias são obtidas do trabalho de Aliano Filho (2012), sendo todas com 29 culturas de plantio e considerando 12 meses para rotação. Cada instância difere no número de lotes, sendo 10, 15 e 20 lotes respectivamente.

Na Tabela 1, são apresentados os dados das culturas disponíveis para o plantio, onde cada cultura contém: nome da cultura, família botânica, época de plantio, ciclo de vida (em meses) e suas respectivas lucratividades (em R\$/ha). O período de pousio também é considerado como uma cultura para os métodos, no entanto não possui uma lucratividade associada.

Tabela 1 - Culturas disponíveis para o plantio (ALIANO FILHO, 2012).

Id	Cultura	Família	Época de Plantio		Ciclo de vida (t)	Lucratividade (R\$)
			Início	Fim		
1	Alface	1 <i>Compositae</i>	Ano todo		2	300
2	Almeirão	1 <i>Compositae</i>	Ano todo		4	150
3	Couve	2 <i>Brassicaceae</i>	Março	Junho	3	300
4	Brócolis	2 <i>Brassicaceae</i>	Fevereiro	Junho	7	400
5	Repolho	2 <i>Brassicaceae</i>	Fevereiro	Junho	4	400
6	Couve-Flor	2 <i>Brassicaceae</i>	Março	Junho	4	900
7	Beterraba	3 <i>Chenopodiaceae</i>	Março	Julho	2	810
8	Espinafre	3 <i>Chenopodiaceae</i>	Fevereiro	Julho	2	600
9	Abobrinha	4 <i>Cucurbitaceae</i>	Agosto	Março	4	400
10	Moranga	4 <i>Cucurbitaceae</i>	Setembro	Janeiro	5	200
11	Pepino	4 <i>Cucurbitaceae</i>	Ano todo		4	450
12	Melancia	4 <i>Cucurbitaceae</i>	Agosto	Outubro	3	900
13	Alho	5 <i>Liliaceae</i>	Março	Abril	6	810
14	Cebola	5 <i>Liliaceae</i>	Março	Junho	4	430
15	Quiabo	6 <i>Malvaceae</i>	Agosto	Março	7	710
16	Milho	7 <i>Gramineae</i>	Agosto	Abril	3	350
17	Aveia	7 <i>Gramineae</i>	Março	Maio	6	350
18	Tomate	8 <i>Solanaceae</i>	Ano todo		5	810
19	Pimentão	8 <i>Solanaceae</i>	Ano todo		5	550
20	Batata	8 <i>Solanaceae</i>	Agosto	Outubro	3	240
21	Cenoura	9 <i>Umbelliferae</i>	Março	Julho	4	620
22	Salsinha	9 <i>Umbelliferae</i>	Setembro	Março	6	400
23	Feijão-Vagem	10 <i>Leguminosae</i>	Agosto	Abril	4	750
24	Ervilha	10 <i>Leguminosae</i>	Março	Abril	3	830
25	Feijão	10 <i>Leguminosae</i>	Agosto	Setembro	3	720
26	Crotalália	10 <i>Leguminosae</i>	Setembro	Dezembro	3	-
27	Feijão-de-Porco	10 <i>Leguminosae</i>	Setembro	Dezembro	3	-
28	Mucuna	10 <i>Leguminosae</i>	Setembro	Janeiro	3	-
29	Ervilha Peluda	10 <i>Leguminosae</i>	Março	Junho	4	-
30	Pousio	-	Ano todo		1	-

A Figura 6 apresenta uma ilustração com a relação de adjacência entre os lotes para as três instâncias consideradas (10, 15 e 20 lotes), onde é possível observar que o lote 1 é vizinho do lote 2 e do lote 4, mas não é vizinho do lote 5.

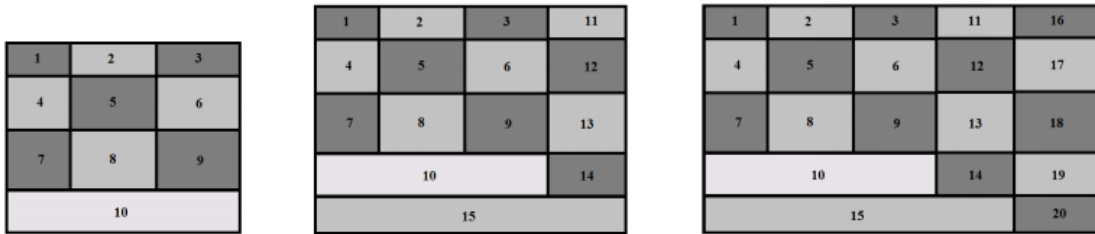


Figura 6 - Relação de adjacência entre os lotes para cada instância (ALIANO FILHO, 2012).

A Tabela 2 apresenta o tamanho (área) em hectares (ha) de cada lote utilizado nas instâncias.

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

Lote	Área	Lote	Área
1	1,50	11	2,00
2	2,00	12	3,00
3	2,00	13	4,00
4	2,25	14	3,00
5	3,00	15	5,50
6	3,00	16	2,50
7	3,00	17	3,75
8	4,00	18	5,00
9	4,00	19	3,75
10	8,25	20	2,50

A partir desses dados, cada versão da CS (com SA e com GRASP) foi executada 100 vezes para cada instância, com o objetivo de avaliar a eficiência e o desempenho dos métodos e ainda comparar os resultados obtidos com outros encontrados na literatura.

5 RESULTADOS

Para calibração dos parâmetros da CS, as três instâncias (10, 15 e 20 lotes) foram resolvidas 5 vezes, variando sempre os valores de cada parâmetro. Assim, um parâmetro recebeu vários valores enquanto os demais continuaram com valores fixos e, então, foi adotado como valor final para cada parâmetro aqueles que obtiveram o melhor resultado médio encontrado entre as 5 execuções para cada instância. Após definir o valor mais adequado para um parâmetro, outro parâmetro foi escolhido por meio do mesmo processo, até que todos os parâmetros fossem definidos. Ao final da calibração, os parâmetros foram definidos para o CS+GRASP e para o CS+SA conforme apresentado na Tabela 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros do CS+GRASP após a calibração.

Parâmetro	Significado	Valor
γ	Número máximo de <i>clusters</i>	10
λ	Volume máximo para aplicação da busca local	7
r_{max}	Limite para aplicação da perturbação	4
G_{max}	Número máximo de iterações para o GRASP	10000

Tabela 4 - Valores dos parâmetros da CS+SA após a calibração.

Parâmetro	Significado	Valor
γ	Número máximo de <i>clusters</i>	10
λ	Volume máximo para aplicação da busca local	7
r_{max}	Limite para aplicação da perturbação	4
T_0	Temperatura inicial para o SA	1000
T_C	Temperatura de congelamento para o SA	0,001
α	Taxa de resfriamento para o SA	0,975
SA_{max}	Número máximo de iterações para o SA	1000

Feita a calibração dos parâmetros da CS, a mesma foi executada por 100 vezes para cada instância. Os principais parâmetros da CS, γ , λ e r_{max} , foram variados nos intervalos [5,12], [3,10] e [2,5], respectivamente.

Um processo similar foi adotado para calibração do “peso” p utilizado na função objetivo (8). Nesse caso, foram utilizados os valores 1000, 10000, 100000 e 1000000. Para os dois primeiros valores, a CS resultou, alguns casos, em soluções inviáveis. Já para o último valor, foi possível notar uma piora no desempenho do SA (devido ao critério de aceitação), que atua como gerador de soluções para a CS. Assim, foi utilizado o valor de 100000, para o qual a CS resultou em soluções viáveis

em todos os casos. Os resultados obtidos em cada método são apresentados na Tabela 5 e 6, sendo que o resultados obtidos na Tabela 6 foram melhorias de um trabalho anterior que gerou um artigo científico publicado por Araújo e Mauri (2013). Nessas tabelas, é apresentado, para cada instância, o valor da melhor solução encontrada e a solução média (entre as 100 execuções), o desvio $((\text{Melhor} - \text{Média})/\text{Melhor}) * 100$) e o tempo médio de execução.

Tabela 5 - Resultados obtidos por meio de 100 execuções do CS+GRASP proposto.

Instância	Melhor Solução (R\$)	Solução Média (R\$)	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
10 Lotes	59963,00	51652,50	13,90	2,34
15 Lotes	88935,00	73550,00	17,29	4,04
20 Lotes	118123,00	106394,30	9,92	6,05

Tabela 6 - Resultados obtidos por meio de 100 execuções da CS+SA proposta.

Instância	Melhor Solução (R\$)	Solução Média (R\$)	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
10 Lotes	86330,00	78149,40	9,47	8,35
15 Lotes	126677,50	118374,00	6,55	40,00
20 Lotes	176630,00	168399,65	4,66	51,94

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram, respectivamente, as melhores programações de plantio (soluções) obtidas pela CS+SA para as 3 instâncias do PRC-A (10, 15 e 20 lotes). Nessas figuras, os números representam as culturas listadas na Tabela 1 (coluna Id).

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	30	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	30
2	16	30	24	24	24	7	7	12	12	12	16	16
3	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
4	23	23	23	23	7	7	30	12	12	12	1	1
5	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
6	23	23	23	1	1	7	7	12	12	12	30	23
7	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
8	16	30	30	24	24	24	21	21	21	21	16	16
9	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
10	23	23	23	1	1	7	7	12	12	12	30	23

Figura 7 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 10 lotes.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
2	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
3	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
4	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
5	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
6	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
7	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
8	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
9	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
10	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
11	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
12	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30
13	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
14	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
15	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30

Figura 8 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 15 lotes.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
2	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
3	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
4	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
5	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
6	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
7	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18
8	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
9	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
10	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
11	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
12	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30
13	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
14	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
15	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30
16	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30
17	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30
18	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12
19	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30
20	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18

Figura 9 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+SA com 20 lotes.

As melhores programações de plantio obtidas pela CS+GRASP para as 3 instâncias do PRC-A (10, 15 e 20 lotes) são ilustradas nas Figuras 10, 11 e 12. Nessas figuras, é possível notar uma grande repetição da distribuição das culturas sobre os lotes e um desperdício em meses com períodos de pousio consecutivos. Isso ocorreu devido a uma ineficiência na implementação da heurística de construção do GRASP de forma que atenda todas as restrições impostas pela modelagem do problema.

		Ano 1											
Lote/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1	1	1	30	24	24	24	11	11	11	11	30	30	
2	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
3	1	1	30	24	24	24	11	11	11	11	30	30	
4	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
5	30	8	8	24	24	24	11	11	11	11	30	30	
6	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
7	30	8	8	24	24	24	11	11	11	11	30	30	
8	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
9	1	1	30	24	24	24	11	11	11	11	30	30	
10	23	23	23	7	7	6	6	6	6	30	30	23	

Figura 10 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 10 lotes.

		Ano 1											
Lote/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
2	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
3	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
4	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
5	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
6	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
7	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
8	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
9	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
10	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
11	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
12	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	
13	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
14	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
15	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	

Figura 11 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 15 lotes.

		Ano 1											
Lote/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
2	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
3	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
4	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
5	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
6	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
7	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	
8	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
9	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
10	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
11	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
12	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	
13	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
14	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
15	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	
16	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	
17	30	11	11	11	11	3	3	3	25	25	25	30	
18	1	1	30	24	24	24	7	7	30	12	12	12	
19	28	28	28	2	2	2	2	16	16	16	30	30	
20	18	18	18	24	24	24	30	12	12	12	18	18	

Figura 12 - Melhor programação de plantio encontrada para a CS+GRASP com 20 lotes.

5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

As Tabelas 7 e 8 apresentam uma comparação entre a média das soluções obtidas pelo CS+GRASP e pelo CS+SA com os diversos métodos propostos por Aliano Filho (2012). Observa-se na Tabela 8 que o CS+SA desenvolvido neste trabalho apresentou uma melhora significativa em relação à média da lucratividade apresentada por Aliano Filho (2012), sendo 65,48% maior que o AG, 22,29% maior que o *Simulated Annealing* (SA), 39,59% maior que o AM e 23,49% maior que a heurística híbrida AG+SA. O CS+GRASP (Tabela 7) apresentou apenas uma melhora em relação ao AG e piora em relação aos outros métodos apresentados por Aliano Filho (2012), sendo 5,02% maior que o AG, 22,38% menor que o SA, 11,40% menor que AM e 21,62% menor que o AG+SA.

Tabela 7 - Comparação das soluções da CS+GRASP com outros métodos da literatura.

Método	Instância			Total	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
CS+GRASP	51652,50	73550,00	106394,30	231596,80	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	55022,00	74910,00	90590,00	220522,00	5,02
SA	68304,00	101200,00	128890,00	298394,00	-22,38
AM	55369,00	86916,00	119140,00	261425,00	-11,40
AG+SA	66985,00	91796,00	136708,00	295489,00	-21,62

Tabela 8 - Comparação das soluções da CS+SA com outros métodos da literatura.

Método	Instância			Total	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
CS+SA	78149,40	118374,00	168399,65	364923,50	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	55022,00	74910,00	90590,00	220522,00	65,48
SA	68304,00	101200,00	128890,00	298394,00	22,29
AM	55369,00	86916,00	119140,00	261425,00	39,59
AG+SA	66985,00	91796,00	136708,00	295489,00	23,49

O tempo computacional médio para as 100 execuções de cada método para cada instância é apresentado na Tabela 9. Nessa tabela, pode-se observar que todos os métodos apresentaram tempos computacionais muito pequenos.

Tabela 9 - Comparação dos tempos computacionais médios obtidos.

Método	Tempo computacional (s)			Tempo Médio (seg.)	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
CS+GRASP	2,34	4,04	6,05	4,14	-
CS+SA	8,35	40,00	51,94	33,43	-87,61
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	19,50	36,20	56,30	37,33	-88,90
SA	49,34	104,26	181,16	111,58	-96,28
AM	4,13	9,71	22,62	12,15	-65,92
AG+SA	6,38	10,65	13,67	10,23	-59,53

Todos os experimentos foram realizados utilizando a linguagem de programação C++ em um computador com processador *Intel Core I5 2.60GHz* com 8GB de memória RAM. Os experimentos computacionais de Aliano Filho (2012) foram realizados no *software* Matlab versão 7.4.0 R2007a, em um computador com processador *Core 2 Quad* com 2GB de memória RAM.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou diferentes alternativas para resolução de um dos problemas encontrados no planejamento agrícola de produção de hortaliças, conhecido como Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O PRC-A é um problema de otimização combinatória complexo, pois envolve um número grande de culturas com limitações particulares e características muito variadas.

Para resolução do PRC-A, foi proposta a aplicação da meta-heurística *Clustering Search* (CS), combinando diferentes métodos heurísticos como geradores de soluções. A CS vem apresentando bons resultados na resolução de outros problemas combinatoriais e ainda não havia sido explorada para resolução do PRC-A.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência dos métodos propostos, sendo que o *Simulated Annealing* (SA) utilizado como gerador de soluções se destacou por obter melhores resultados em um tempo consideravelmente pequeno, enquanto o GRASP demonstrou ser um método aplicável, mas razoavelmente não produtivo para este problema em específico.

Assim, fica evidente que a CS pode ser considerada como uma nova e boa alternativa para resolução do PRC-A e que melhorias nos métodos e/ou novas versões da CS podem tornar as soluções do problema ainda melhores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFANDARI, L.; 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.

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. *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. Porto Alegre: Agropecuária, 2002. 592 p.

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.

CHAVES, A. A.; LORENA, L. A. N. Clustering search algorithm for the capacitated centered clustering problem. *Computers & Operations Research*, v. 37, p. 552-558, 2010.

CHAVES, A. A. *Uma meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória*. 196 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

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*, 2011. Doi: 10.1007/s10479-010-0830-y.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.

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.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 498-516, 1983.

MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Uma nova abordagem para o problema dial-a-ride. *Produção*, v. 19, n. 1, p. 41-54, 2009.

OLIVEIRA, A. C. M; LORENA, L. A. N. Detecting promising areas by evolutionary clustering search. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, v. 3171, p. 385-394, 2004.

_____. Hybrid evolutionary algorithms and clustering search. *Hybrid Evolutionary Algorithms - Studies in Computational Intelligence*, v. 75, p. 77-99, 2007.

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. *Programação de rotação de culturas - modelos e métodos de solução*. 2009. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-09062009-110129/>>.

Acesso em: 03 jul. 2014.

SANTOS, L. M. R.; COSTA, A. M.; ARENALES, M. N., SANTOS, R. H. S. Sustainable vegetable crop supply problem. *European Journal of Operational Research*, v. 204, p. 639-647, 2010.

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.