Alguns problemas de planejamento de rotação de culturas

Lana Mara R. dos Santos[1], Alysson M. Costa[2], Marcos N. Arenales[2]

[1]Departamento de Matemática – Universidade Federal de Viçosa
Viçosa-MG, Brazil.

[2] Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – Universidade de São Paulo

Caixa Postal 668 – 13560-970 – São Carlos – SP – Brazil

lanamara@ufv.br,{alysson, arenales}@icmc.usp.br

Abstract. *In this article, we study the programming of crop rotation plans in the context of vegetable production under ecologically-based constraints. We discuss some problem variants and, for one of them, we describe a mathematical model, a solution methodology and a decision-aid software.*

Resumo. *Neste artigo, estudamos a programação da rotação de culturas em um contexto de produção de hortaliças com restrições de base sustentável. Variações do problema são discutidas e, para uma delas, apresentamos um modelo matemático, um método de resolução e um software de apoio à decisão.*

1. Introdução

Sistemas de produção agrícola baseados em grandes monoculturas são predominantes no Brasil, principalmente desde as décadas de 60 e 70. Apesar de tais modelos produtivos serem capazes de reduzir os custos dos alimentos, eles também estão associados a uma série de problemas ambientais e sociais. Além de dependerem do uso intensivo de adubos minerais solúveis, agrotóxicos e energia fóssil, eles implicam, em geral, na exclusão de pequenos produtores agrícolas devido à grande quantidade de recursos de capital e do reduzido número de trabalhadores necessários para suas implementações.

Em resposta a tais problemas, surgiram e/ou ganharam evidência formas alternativas de agricultura tais como a biodinâmica, a permacultura e a agricultura natural. Tais modelos produtivos foram impulsionados por iniciativas privadas como a criação de feiras e estruturas próprias de comercialização e governamentais como, por exemplo, a publicação pelo Ministério da Agricultura

da Instrução Normativa nº 7, de 19 de maio de 1999, regulamentando a produção orgânica no Brasil.

O eixo central dos modelos sustentáveis de produção é a diversificação das áreas de cultivo. Diversos estudos agronômicos e ecológicos demonstram que o aumento da diversidade de espécies vegetais no ambiente traz benefícios como a melhor exploração dos recursos produtivos, um menor ataque de herbívoros e menor incidência de patógenos, um maior controle de plantas espontâneas, uma maior produção por área e maior estabilidade da produção frente às pressões ambientais (Altieri, 2002). De um ponto de vista social, a diversificação da produção também resulta em menor vulnerabilidade dos agricultores frentes às oscilações dos preços dos produtos, melhor distribuição das receitas ao longo do ano e a oferta de alimentos variados à população. Assim, pode-se dizer que critérios que aumentem a eficiência da diversificação na alocação de culturas acabam contribuindo para uma maior sustentabilidade do processo agrícola.

A principal estratégia usada para incrementar a diversificação da vegetação no tempo é a *rotação de culturas*. Neste sistema, culturas diferentes são plantadas em uma mesma área de maneira sucessiva e este plano de produção é repetido periodicamente. Dentre os critérios ecológicos usados para selecionar as culturas de uma rotação, podem ser relacionados: (a) o não-cultivo de plantas de mesma família botânica em sequência temporal imediata, pois embora existam organismos-pestes generalistas, muitas pragas e doenças atacam culturas de mesma família; (b) o plantio de culturas, nomeadas de adubação verde (usualmente leguminosas), para a fixação de nitrogênio no solo; e (c) a utilização de períodos de pousio, em que a vegetação espontânea cresce livremente por um período definido, o que contribui para o controle biológico de diversos insetos e para recuperar a estrutura física, química e biológica do solo (Gliessman, 2000).

Algumas classes de problemas de rotação de culturas têm sido abordadas por meio de modelos de otimização linear por autores como El-Nazer e McCarl (1986), Clarke (1989), Haneveld e Stegeman (2005), Detlefsen e Jensen (2007) e Santos et al. (2008; 2009). Outros artigos sobre o tema apresentam ferramentas de apoio à tomada de decisão para avaliar o efeito de diversas rotações (Jones et al., 2003; Stöckle et al., 2003, Bachinger e Zander, 2006, entre outros).

Neste trabalho, nos concentramos no planejamento de rotação de culturas para a produção de hortaliças. Neste contexto, deve-se levar em conta que as culturas apresentam ciclos produtivos com duração distinta, exigem estações do ano específicas para o cultivo, permitem várias culturas durante o

ano em uma mesma área e têm uma maior incidência de doenças e sensibilidade às condições climáticas em comparação com outras culturas. Tais características tornam a tarefa de programar rotações respeitando restrições de sustentabilidade como as citadas em (a)-(c) uma tarefa complexa, para a qual um *software* de apoio à decisão pode ser útil, quando não essencial.

Neste artigo mencionamos brevemente três problemas de programação de rotação de hortaliças (Seção 2). Para um deles, apresentamos um modelo matemático (Seção 3), um método de resolução (Seção 4) e um protótipo de *software* de apoio à decisão (Seção 5). Conclusões e perspectivas gerais encerram este artigo na Seção 6.

2. Alguns Problemas de Programação de Rotação de Culturas

A programação de culturas no contexto da produção de hortaliças com restrições de base sustentável dá origem a diversos problemas de otimização. Nesta seção, mencionamos brevemente três deles.

2.1 Programação da produção para atendimento de demanda

A produção de hortaliças tem-se destacado como uma das alternativas de renda para pequenos agricultores (Campanhola e Valarini, 2001). Tais produtores possuem, em geral, pequenas áreas de plantio e pequeno volume de produção. Esta produção é usualmente descontínua devido, principalmente, a condições climáticas e do solo que restringem o cultivo de determinadas espécies em determinadas regiões ou reduzem em muito sua produtividade. Por outro lado, aspectos econômicos muitas vezes exigem que seja atingido um volume mínimo de produção para viabilizar custos de logística.

Para lidar com estes problemas, cada vez mais comumente, pequenos produtores agrícolas se unem em movimentos coletivos, tais como cooperativas ou associações, para que os requisitos mínimos de constância, volume e uniformidade da produção sejam atingidos. No sudeste do Brasil existem exemplos dessas associações como Sítio do Moinho (RJ), Horta e Arte (SP), além de feiras coletivas (Campanhola e Valarini, 2001). Esses empreendimentos coletivos devem organizar não somente o tamanho das áreas de plantio com cada cultura, para responder a demanda de mercado, mas também decidir onde e quando a produção ocorrerá. Devido às diferenças entre os tipos de solo e as condições climáticas, a produtividade de uma cultura, bem como o conjunto de culturas passíveis de cultivo, dependem da área de plantio.

Santos et al. (2009) lidam com este problema com o intuito de obter programações de produção que supram a demanda de um conjunto de hortaliças tendo-se disponível um conjunto de áreas heterogêneas. O problema é formulado como um modelo de otimização linear em que cada variável está associada a uma programação de rotação de culturas. O modelo contém potencialmente um número grande de programações de rotação sujeito as restrições (a)−(c) e é resolvido pela técnica de geração de colunas, em que subproblemas de otimização combinatória devem ser resolvidos para decidir o plantio dos lotes.

2.2 Programação da produção para atendimento de demanda com estoque

Uma extensão do problema mencionado na subseção anterior aparece quando existe possibilidade de estocagem. Neste caso, o suprimento da demanda não mais necessariamente é realizado a partir de produtos recém colhidos, mas pode ser feito através do que houver em estoque. Devido à perecibilidade deles, o estoque só pode ser realizado durante um período limitado de tempo e, ainda assim, com perdas associadas. A possibilidade de estoque confere uma maior flexibilidade e uma maior complexidade ao problema. Costa et al. (2009)

propõem um modelo linear inteiro misto que faz uso de variáveis com dependência temporal (Gouveia, 1999). Os autores descrevem um método de geração de colunas e analisam os ganhos obtidos devido à presença dos estoques.

2.3 Problema de programação da produção com restrições de adjacência (PRC-A)

As restrições de produção sob base sustentável não necessariamente são limitadas às condições (a)-(c) apresentadas na introdução. De fato, diversas outras características podem ser exploradas. Santos (2009) propõe a utilização de restrições sobre as culturas que podem ser plantadas em lotes vizinhos. A idéia é estender as restrições de não-cultivo sequencial (no tempo) de culturas da mesma família botânica e impedir que culturas de mesma família sejam cultivadas simultaneamente em áreas vizinhas.

Este problema é usado no restante deste trabalho como forma de demonstrar a viabiliade da utilização de modelos matemáticos e técnicas algorítmicas de resolução, e da implementação destes em um software de apoio à decisão. Na seção seguinte o problema é descrito e matematicamente modelado. Uma técnica de resolução é apresentada na Seção 4 e um *software* de apoio à decisão é mostrado na Seção 5.

3. Modelo matemático para o PRC-A

Considere uma rotação de culturas de T anos e uma unidade de tempo que divide T em M períodos. A *programação de rotação de culturas* (ou simplesmente *programação de rotação*) de tamanho M é um calendário de plantio e cultivo, na base de tempo adotada (dia, semana etc.), de cada cultura na rotação. Determinar uma programação de rotação para um lote implica em escolher que culturas plantar e em que período. Entre possíveis critérios na escolha do plano de rotação foram atendidos os seguintes aspectos técnicos e restrições de base ecológica anteriormente mencionados:

(i) Cada cultura tem um período mais cedo e mais tarde de plantio que deve ser respeitado e as culturas podem ter diferentes ciclos de cultivo (intervalo de tempo do plantio à colheita).

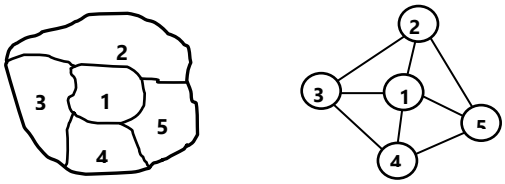
(ii) *Vizinhança temporal:* Culturas de mesma família botânica não são plantadas em sequência.

(iii) A inserção de culturas para adubação verde e de pousios de tamanho pré–determinado são exigidos na programação de cada rotação.

Além destas restrições, a fim de dificultar a propagação de pragas e doenças a áreas vizinhas, a seguinte restrição deve ser atendida:

(iv) *Vizinhança espacial:* culturas de mesma família não são cultivadas em uma mesma época em lotes adjacentes.

Para representar a área de plantio particionada em lotes, seja G(V, A) um grafo conexo de modo que o conjunto de vértices V corresponde aos lotes e (u, v) $\in$ A se, e somente se, os lotes *u* e *v* são adjacentes. A Figura 1(a) ilustra uma área particionada em 5 lotes e a Figura 1(b) o grafo G associado.



(a) **(b)**

Figura 1. Área de plantio particionada em 5 lotes

Desta forma, dado um conjunto de *N* culturas em *NF* famílias botânicas e uma área de plantio representada por um grafo G(V, A), o problema PRC-A consiste em determinar uma programação de rotações de culturas para uma área de plantio dividida em *L* lotes que maximize a ocupação dos lotes e sujeita às restrições de (i)-(iv).

A Figura 2 exibe uma programação de rotação factível para a área de plantio da Figura 1. Os dados para as culturas estão na Tabela 1. As culturas 25 a 28 são para adubação verde.

Tabela 1. Dados das culturas: nome, família, época de plantio e ciclo de cultivo.

	CULTURA		FAMÍLIA	ÉPOCA PLANTIO		CICLO
				Início	*Fim*	
1	Alface	1	*Compositae*	ano todo		5
2	Almeirão	1	*Compositae*	ano todo		12
3	Couve	2	*Brassicaceae*	março	junho	10
4	Brócolis	2	*Brassicaceae*	fevereiro	junho	23
5	Repolho	2	*Brassicaceae*	fevereiro	julho	13
6	Couve-Flor	2	*Brassicaceae*	março	junho	14
7	Beterraba	3	*Chenopodiaceae*	março	julho	7
8	Espinafre	3	*Chenopodiaceae*	fevereiro	julho	5
9	Abobrinha	4	*Cucurbitaceae*	agosto	março	14
10	Moranga	4	*Cucurbitaceae*	setembro	janeiro	15
11	Pepino	4	*Cucurbitaceae*	ano todo		14
12	Alho	5	*Liliaceae*	março	abril	18
13	Cebola	5	*Liliaceae*	março	junho	12
14	Quiabo	6	*Malvaceae*	agosto	março	23
15	Milho	7	*Gramineae*	agosto	abril	10
16	Aveia	7	*Gramineae*	março	maio	18
17	Tomate	8	*Solanaceae*	ano todo		15
18	Pimentão	8	*Solanaceae*	ano todo		16
19	Jiló	8	*Solanaceae*	setembro	fevereiro	19
20	Cenoura	9	*Umbelliferae*	março	julho	14
21	Salsinha	9	*Umbelliferae*	setembro	março	19
22	Feijão Vagem	10	*Leguminosae*	agosto	abril	11
23	Ervilha	10	*Leguminosae*	março	abril	9
24	Feijão	10	*Leguminosae*	agosto	setembro	9
25	Crotalária	10	*Leguminosae*	setembro	dezembro	9
26	Feijão-de-Porco	10	*Leguminosae*	setembro	dezembro	8
27	Mucuna	10	*Leguminosae*	setembro	janeiro	11
28	Ervilha Peluda	10	*Leguminosae*	março	junho	14

Para este exemplo, o tamanho da rotação para cada lote foi fixado em 2 anos dividido em períodos de 10 dias. Um pousio obrigatório de 3 períodos (1 mês) foi exigido na programação de cada lote. O pousio está representado pela cultura fictícia 29.

Como pode ser visto na Figura 2, as restrições (i)–(iv) foram atendidas: para cada lote, a programação de rotação de culturas satisfaz as restrições (i)–(iii) e lotes vizinhos não cultivam ao mesmo tempo culturas de mesma família botânica. A restrição (iv) é somente imposta a lotes adjacentes e consequentemente, lotes não-contíguos podem cultivar, simultaneamente no tempo, culturas de mesma família botânica. Na programação para os lotes 2 e 4, por exemplo, a cultura 26, para adubação verde, tem parte do seu cultivo em períodos iguais em ambos os lotes.

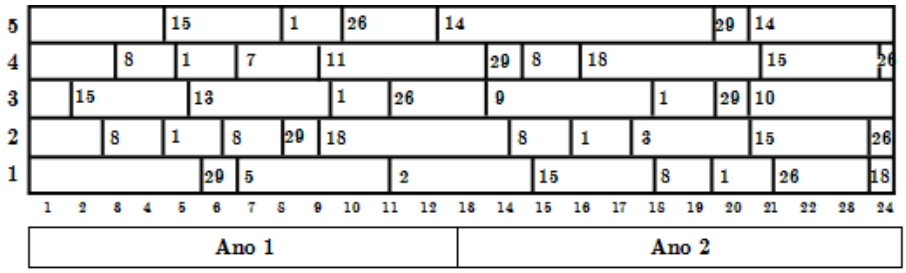


Figura 2. Programação de rotação para o grafo G.

Para apresentar a formulação matemática para o problema PRC–A, proposta em Santos et al. (2009), considere os seguintes parâmetros e variáveis.

Parâmetros:

G(V, A)	grafo associado à área de plantio (L = |V| é o total de lotes);
M	número de períodos em uma programação;
N	número de culturas que podem ser selecionadas para o plantio;
G	conjunto de culturas para adubação verde;
$F(p)$	conjunto de culturas da família botânica p, $p = 1..NF$;
t_i	ciclo de cultivo da cultura i, incluindo períodos para o preparo do solo e colheita;
I_i	conjunto de períodos em que a cultura i pode ser plantada.
N+1	cultura fictícia representando o pousio de tamanho pré–definido.

Variáveis de decisão:

x_{ijk} = 1, se a cultura *i* é plantada no período *j* e no lote k e 0, caso contrário.

Formulação matemática:

$$z_{PRCA} = \max \sum_{k=1}^{L} \sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} t_i x_{ijk} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sum_{r=0}^{t_i - 1} x_{i,j-r,k} \leq 1, \; j = 1..M, k = 1..L \quad (2)$$

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

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{i \in G} x_{ijk} = 1, \; k = 1..L \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{M} x_{N+1,j,k} = 1, \; k = 1..L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in F(p)} \sum_{r=0}^{t_i - 1} [x_{i,j-r,u} + x_{i,j-r,v}] \leq 1, p = 1..NF, j = 1..M, (u,v) \in A \quad (6)$$

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

Em (2), (3) e (6), $j - r \leq 0$ é substituído por $j - r + M$.

A função (1) fornece o tempo total de cultivo a ser maximizado. As variáveis são ponderadas pelo ciclo de cultivo da cultura para permitir que tenham possibilidade de serem escolhidas, sem influência significativa do tamanho do ciclo da cultura a que se referem. As variáveis associadas à adubação verde e ao pousio foram excluídas da função objetivo, pois se exige apenas que, em cada rotação, uma delas seja cultivada uma única vez.

As restrições (2) impedem que duas culturas ocupem simultaneamente o mesmo espaço, as restrições (3) proíbem que culturas de mesma família possam ser cultivadas consecutivamente no mesmo período, dentro de um mesmo lote. As restrições (4) e (5), referem-se, respectivamente, ao plantio de uma cultura para adubação verde e um pousio na programação de cada lote. As restrições (6) proíbem que culturas de mesma família botânica sejam cultivadas ao mesmo tempo em lotes adjacentes.

4. Métodos de Solução

O modelo de otimização (1)–(7) apresenta um número grande de restrições e variáveis dificultando sua resolução por um algoritmo de enumeração implícita padrão do tipo *branch–and–bound*. Uma alternativa para diminuir a dimensão do problema é decompô–lo em subproblemas, cada um com um número menor de lotes, garantindo–se que ao agrupar os subconjuntos de lotes as restrições de adjacências (6) sejam satisfeitas. Esta estratégia de decomposição para o problema foi utilizada tanto na heurística construtiva *lote–a–lote*, descrita a seguir, quanto na reformulação do modelo usando o princípio de decomposição de Dantzig–Wolfe (Dantzig e Wolfe, 1960), permitindo sua resolução pelo pela técnica de geração de colunas em procedimentos heurísticos e exatos (Santos, 2009).

Os principais passos da heurística construtiva *lote-a-lote* são:

1. Busque uma programação para os L lotes contendo apenas adubação verde e pousio em cada lote. Se não existe tal programação, então PARE. O problema PRC–A não tem solução. Caso contrário, faça $k = 1$ e ordene os L lotes.

2. Se $k = L$, então PARE. Uma programação para os L lotes foi obtida. Caso contrário, para o lote $k + 1$, fixe em zero as variáveis que garantam que:

   2.1 As restrições (2) de ocupação de espaço sejam satisfeitas com as variáveis fixadas pelo passo anterior.

   2.2 As restrições (3) de vizinhança temporal para culturas de mesma família sejam satisfeitas para este lote.

   2.3 As restrições (6) de vizinhança espacial sejam satisfeitas para o lote $k+1$ e os lotes adjacentes a ele, já alocados nas iterações anteriores.

3. Encontre uma boa programação factível (ou ótima) para o lote $k+1$, faça $k = k+1$ e volte em 2.

A heurística *lote–a–lote* foi usada para gerar uma solução para o aplicativo discutido na próxima seção. Neste caso os lotes foram ordenados usando um algoritmo de busca em largura.

Santos (2009) discutem outras metodologias de solução heurísticas e exatas para o problema PRC-A.

5. Aplicativo

Considerando-se a necessidade de traduzir os algoritmos propostos em ferramentas de fácil utilização, apresentamos nesta seção o protótipo de um software de apoio à decisão desenvolvido para o PRC-A. Uma interface permite ao usuário inserir as informações sobre as culturas desejadas (em particular, ciclos e épocas de plantio) e sobre as características dos lotes de plantio, conforme visto na Fig. 3.

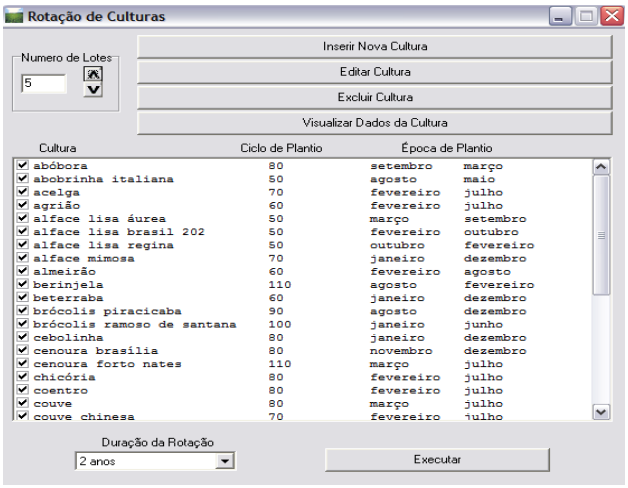


Figura 3. Tela inicial do aplicativo de rotação de culturas.

A ferramenta de apoio é então capaz de fornecer um planejamento da programação da produção que respeita as restrições de produção ecológica assim como as restrições tecnológicas associadas à cada cultura. O resultado é apresentado ao usuário por uma saída visual que mostra a ocupação dos lotes ao longo do tempo, conforme mostrado na Fig. 4.

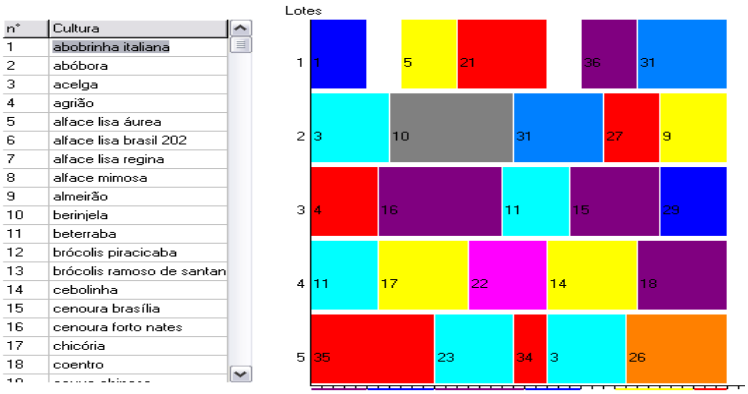


Figura 4. Programação de rotação para 5 lotes em paralelo

A programação é obtida pela heurística descrita na Seção 4. O passo 3 da heurística apresentada na sessão anterior é resolvido por um problema de programação 0-1. Cada um destes problemas é resolvido utilizando-se o aplicativo SYMPHONY, uma biblioteca de código aberto para a resolução de problemas de otimização linear inteiro–misto (Ralphs e Güzelsoy, 2006) integrado ao COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*). A utilização de código aberto permite não apenas a distribuição gratuita do software desenvolvido, bem como a possível utilização deste como base para o desenvolvimento de novas versões ou adaptações.

6. Conclusão e perspectivas

Neste artigo apresentamos alguns problemas associados à programação de rotação de culturas no contexto de produção de hortaliças com restrições de base ecológica. Para um dos problemas, apresentamos um modelo matemático, um método de resolução e um *software* de apoio à decisão. O objetivo deste artigo é mostrar como técnicas matemáticas permitem o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão que possam ser utilizadas por pequenos produtores. O custo de tais ferramentas pode ser reduzido com a utilização de bibliotecas de código aberto, o que tem a vantagem adicional de facilitar a adaptação e extensão dos modelos propostos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Juliana Martinelli e Márcio Furlani Carmona pela ajuda na implementação dos algoritmos e interface. Também agradecem a CAPES, CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro dado ao desenvolvimento deste trabalho.

7. Referências

Costa AM, Santos LMR, Alem DJ, Santos, RHS (2009) "Sustainable Vegetable Crop Supply Problem with Perishable Stocks", Working paper.

Altieri MA. (2002). Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. Guaíba: Editora Agropecuária.

Bachinger J, Zander P. (2006). "ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems". European Journal Agronomy, 26, 130–143.

Campanhola C, Valarini PJ. (2001). "A agricultura orgânica e seu potencial para o pequeno agricultor". Cadernos de Ciência & Tecnologia, 18(3), 69-101.

Dantzig GB, Wolfe P. (1960) "Decomposition principle for linear programs". Operations Research 8, 101-111.

Detlefsen N, Jensen AL. (2007). "Modelling optimal crop sequences using network flows". Agricultural Systems 94, 566–572.

El-Nazer T, McCarl BA. (1986). "The choice of crop rotation: A modeling approach and case study". American Journal of Agricultural Economics, 68(1), 127–136.

Gliessman, SR. (2000). Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture. Chelsea: Ann Arbor.

Gouveia, L (1999) Using hop-indexed models for constrained spanning and Steiner tree models, in B. Sansò & P. Soriano (eds), Telecommunications Network Planning, Kluwer, Boston, Kluwer, Boston, pp. 21–32.

Haneveld WK, Stegeman AW. (2005). "Crop succession requirements in agricultural production planning". European Journal of Operations Research, 166, 406–429.

Jones J, Hoogenboom G, Porter C, Boote K, Batchelor W, Hunt L, Wilkens P, Singh U, Gijsman A, Ritchie J. (2003). "The DSSAT cropping system model". European Journal of Agronomy, 18(3), 235-265.

Ralphs TK, Güzelsoy M. (2006). "SYMPHONY 5.1.2 User's Manual", http://branchandcut.org/SYMPHONY/

Santos LMR. (2009) Programação de Rotação de culturas – modelos e métodos de solução. Tese de doutorado. ICMC-USP.

Santos LMR, Michelon P, Arenales MN, Santos, RHS. "Crop rotation scheduling with adjacency constraints" (2008). Annals of Operations Research (DOI: 10.1007/s10479-008-0478-z).

Santos LMR, Costa AM, Arenales MN, Santos, RHS. "Sustainable vegetable crop supply problem" (2009). [Notas do ICMC].

Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. (2003). "CropSyst, a cropping systems simulation model". European Journal of Operations Research, 18, 289–307.

Tillman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polask S. (2002) "Agricultural sustainability and intensive production practices". Nature, 418, 671–677.