

## **ROTAÇÕES DE CULTURAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA**

Angel Ramon Sanchez Delgado<sup>a\*</sup>, Sérgio Drummond Ventura<sup>a</sup>,

Marcelo Dib<sup>a</sup>, P. Parga Rodrigues<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica– RJ, Brasil*

### **Resumo**

O objetivo do trabalho foi desenvolver e implantar um modelo de programação inteira binária que simula a rotação de culturas cuja solução representa um calendário de plantios ótimo de varias culturas (em consórcio ou não com pastagem), cultivadas na estação experimental da Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG) em uma área de 24 hectares, permitindo alternar periodicamente as culturas. O plantio da lavoura de milho BRS 1030 é feito de forma consorciada com os capins braquiária Piatã e braquiária Brizanta ou Panicum massai (Sistema Santa Fé). Já o sorgo forrageiro BRS 5610 é consorciado com o capim Tanzânia. Nos resultados obtidos (em todos os períodos considerados), o consórcio entre as culturas é o mais recomendável nas glebas geradas aleatoriamente. Isto é compatível com os resultados experimentais obtidos pela Embrapa.

Palavras - Chaves: consórcio de culturas, plantio direto, integração lavoura-pecuária

### **Abstract**

The objective of the work was to develop and implement a binary integer programming model which simulates the rotation of crops and whose solution represents an optimum plantation scheduling of many crops (together or not with pasture), all of them cultivated at the experimental farm of Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG) in a area of 24 hectares, what allows to periodically alternate the different crops. The plantation of corn BRS 1030 was scheduled together with grasses brachiaria Piatã and brachiaria Brizanta or Panicum massai (Santa Fé system). Also, forage sorghum BRS 5610 was scheduled together with grass of Tanzania. In the results obtained (and all of the periods considered), the association of cultures is the most recommended in the randomly generated glebes. This is in accordance with the experimental results obtained by Embrapa.

Keys World: association of cultures, direct plantation, crop-livestock integration

\*Autor para correspondência: e-mail: [asanchez@ufrj.br](mailto:asanchez@ufrj.br)

### 1. Introdução

Fundamentalmente a produção agrícola convencional está baseada na monocultura. Tal vez pelo baixo custo operacional e a facilidade de implantação. Mas está provado na prática que isto acarreta uma série de prejuízos tais como, a mobilização de capitais necessários para a aquisição de pesticidas tóxicos, que por sua vez são altamente prejudiciais ao meio ambiente; além disso, a existência de uma facilidade à propagação de pragas e patógenas. Como é evidenciada em Kluthcouski, et al., 2011, a monocultura em um longo prazo, causa exaustão do solo, o que leva à utilização de doses cada vez mais alta de adubos químicos, sem contar que este tipo de medidas pode levar ao empobrecimento do pequeno produtor e à redução de alguns produtos de origem agrícola (Altieri, 2002, Gliessman, 2000).

Pelo registrado no Rio+20 (2012); sem dúvida, que o melhor é uma expansão policultural de forma sustentável que nos permita a preservação ambiental das áreas de plantio, o controle biológico das pragas e o crescimento econômico. É por isso que o tema sobre rotação de culturas tem sido objeto de importância nos estudos da área de agroecologia. Entende-se como rotação de culturas a alternância regular e ordenada do cultivo de diferentes espécies em seqüência temporal numa determinada área. As vantagens da rotação de culturas são inúmeras. Em Cattelan, et al. (1997), Arf, et al. (1999), Santos, et al. (2001), Duarte, et al. (2002), Silveira, et al. (2003), Haneveld, et al. (2005), Cunha, et al. (2007), Kluthcouski, et al. (2011) e Franchini, et al. (2011), se mostra que além de proporcionar uma produção diversificada de alimentos e outros produtos agrícolas, quando é adotada e conduzida de modo adequado e em um período suficientemente longo, essa prática melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo. Além disso, auxilia no controle de doenças, pragas e plantas

daninhas; como também na reposição da matéria orgânica no solo, protegendo-o da ação dos agentes e da erosão.

Procurando a máxima capacidade produtiva do solo, o planejamento da rotação de culturas deve considerar, preferencialmente, plantas comerciais e, sempre que possível, associar espécies que produzam grandes quantidades de biomassa e de rápido desenvolvimento, cultivadas isoladamente ou em consórcio com culturas comerciais. É necessário que o agricultor utilize todas as demais tecnologias à sua disposição: técnicas específicas para controle de erosão; calagem, adubação; qualidade e tratamento de sementes, época e densidade de semeadura, cultivares adaptadas, controle de plantas daninhas, pragas e doenças.

Ora, é bom lembrar que o problema de determinar a rotação de cultura para uma área de lavoura, não é nada novo na pesquisa operacional. Já em 1939, Kantorovich (ver Santos, L.M.R., (2009)) trata o problema utilizando ferramentas matemáticas; mais ainda, em 1949, durante o primeiro congresso em Chicago (USA) de aplicações de Programação Linear, Hildreth e Reiter (1951) apresentam um modelo linear cujo objetivo é o particionamento ótimo de uma área de plantio de modo que cada parcela da terra seja ocupada por uma rotação de culturas definidas previamente. No modelo as variáveis de decisão são o tamanho das áreas com cada rotação. Já em modelos seguintes apresentados por El-Nazer e Mc Carl (1986), Haneveld e Stegeman (2005) e Detlefsen e Jensen (2007), se elimina a necessidade de rotações pré-definidas, resolvendo o problema de rotação de culturas com seqüências de culturas cultivadas uma após a outra. Para isto, assume-se que as áreas de plantio são homogêneas e existe única seção de plantio anual. As variáveis de decisão se referem ao tamanho das áreas de plantio com as seqüências.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

No planejamento de rotação de culturas, alguns princípios devem ser cumpridos, entre eles figuram o não permitir que um cultivo de uma mesma família botânica seja desenvolvido em uma mesma área em períodos consecutivos. Esta restrição visa proteger e conseguir um melhor aproveitamento dos recursos disponibilizados pelo solo. Tem-se observado que o plantio sequencial e imediato de uma mesma cultura em um mesmo espaço (gleba), acarreta o seu empobrecimento, esgotando rapidamente seus recursos minerais, mesmo utilizando altas doses de adubos inorgânicos. A ideia é alternar culturas anuais com culturas anuais em consórcio com pastagem, a fim de aproveitar de forma ótima os recursos naturais da terra, mantendo-a rica em micro-organismos, sais minerais e húmus; como também, uma redução nas taxas de produtos inorgânicos e tóxicos utilizados.

Em geral, procura-se providenciar ao produtor, um calendário ótimo de plantios de varias culturas (em consórcio ou não com pastagem) que permitam a recuperação do solo. Um esquema de rotação deve ter flexibilidade, de modo a atender as particularidades regionais e as perspectivas de comercialização dos produtos. A Embrapa tem mostrado que o uso da rotação de culturas conduz à diversificação das atividades na propriedade, possibilitando estabelecer esquemas que envolvam apenas culturas anuais, tais como: soja, milho, arroz, sorgo, algodão, feijão e girassol, ou de culturas anuais e pastagem.

Trabalhos como os de Santos et al. (2007) e Lemalade, et al. (2011), descrevem as dificuldades dos problemas de rotação de culturas, tendo em vista a natureza das variáveis envolvida e o elevado número de restrições a ser respeitadas; mas considerando que um planejamento cultural estratégico proporciona o equilíbrio necessário quanto aos aspectos ecológicos e econômicos de um sistema de produção,

procura-se desenvolver e implantar de maneira aleatória um modelo de programação inteira binária (Nemhauser, et al., 1999), cuja solução represente um calendário ótimo de plantios de varias culturas (em consórcio ou não com pastagem), cultivadas em uma área dividida em glebas e com alternância periódica (Alvarenga, et al.2008).

### **2. Material e Métodos**

Para realizar a modelagem matemática e implantação computacional do planejamento rotacional e estratégico de cultivos, consideramos como cenário, o sistema de integração lavoura-pecuária implantado pela EmbrapaMilho e Sorgo (Sete Lagoas, MG) em uma área de 24 hectares (Alvarenga,et al., 2008). Nessa tecnologia, o planejamento deve ser executado em função de que as glebas de terra têm que ser utilizadas em um momento com lavouras e em outro com pastagens.

O benefício da alternância entre as modalidades de usos da gleba são os nutrientes residuais deixados pelas lavouras para a pastagem, que passam a produzir forragem em maior quantidade e melhor qualidade. Estas forragens promovem uma reestruturação no ambiente do solo, aumentando o teor de matéria orgânica, o que estimula a melhoria da produção das lavouras que vem a seguir. Desta forma, o produtor aumenta a produção de grãos, carne, leite, fibras ou agroenergia e em consequência sua renda.

No cenário considerado as componentes principais são o milho e a soja para a produção de grãos e sorgo para silagem. O plantio da lavoura de milho BRS 1030 realizado pela Embrapa (2008), foi feito de forma consorciada com os capins braquiária Piatã e braquiária Brizanta ou Panicum massai (Sistema Santa Fé). Já o sorgo forrageiro BRS 5610 foi consorciado com o capim Tanzânia. As pastagens oriundas,

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

principalmente em seqüência à soja, são de alta qualidade, possibilitando altos rendimentos de carne por unidade de área (Broch, et al. 1997).

Desta maneira consideramos os cultivos de Soja (S), Pastagem (PG), Milho+Capim (M+C) e Sorgo+Capim (S+C) em um horizonte de planejamento predeterminado (número de períodos) e determinamos um calendário “ótimo” de rotações de culturas (consorciadas ou não com pastagem) a ser desenvolvidas em cada período e cada gleba. Estamos supondo que cada cultivo é desenvolvido (ou não) em uma e só uma gleba da área considerada. Aqui o ótimo é a máxima “adaptação” ou peso que determinado plantio tem quando se desenvolve em determinada gleba num certo período. Em geral, procuramos um calendário de plantios com máximo peso.

É possível pensar que logo de uma análise físico-química do solo em cada gleba, possamos estabelecer um critério fisiológico (baseado na adaptação e desenvolvimento de cada cultivo em um determinado período), a partir do qual, associamos valores entre zero e um a cada cultivo, indicando o percentual de vantagem que esse cultivo tem em relação ao resto quando é desenvolvido nessa gleba e nesse período. Neste trabalho tais valores foram determinados de forma aleatória considerando seis conjuntos de regras (ou conjunto de restrições) que garantem a sustentação do solo e da produção.

A continuação o modelo matemático que representa a determinação de um calendário rotacional ótimo de cultivos, com dados gerados aleatoriamente. Iniciamos indicando com  $i$  – Períodos ( $i = 1, \dots, m$ );  $j$ - Glebas ou Lotes ( $j = 1, \dots, n$ ;  $n \geq 4$ ) e  $k$ - Cultivos;  $k = 0$  (Pastagem),  $k = 1$  (S-Soja),  $k = 2$  (Milho+Capim),  $k = 3$  (Sorgo+Capim). Também definimos as variáveis:

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

$x_{ijk} = 1$       Se no período  $i$  o cultivo  $k$  é desenvolvido na gleba  $j$ .  
 $= 0$       Caso contrario

Seja  $p_{ijk}$  o peso associado pelo desenvolvimento do cultivo  $k$  na gleba  $j$  no período  $i$ .

### Restrições

1. Em qualquer período  $i$ , cada cultivo  $k$ , deve ser desenvolvido (ou não) em uma e só uma gleba  $j$ .

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1 \quad k = 0, 1, 2, 3; i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{k=0}^3 x_{ijk} = 1 \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad \text{Se } n = 4$$

$$\sum_{k=0}^3 x_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad \text{Se } n > 4$$

2. Se no período  $i$ , o cultivo  $k$  é desenvolvido na gleba  $j$ , então o cultivo  $k$  não pode ser desenvolvido na gleba  $j$  no período  $i + 1$ .

$$x_{ijk} + x_{i+1jk} \leq 1 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n; k = 0, 1, 2, 3$$

3. Se no período  $i$  a pastagem ( $k = 0$ ) é realizada na gleba  $j$ , então no período  $i + 1$ , o cultivo da soja ( $k = 1$ ) deve ser realizada na gleba  $j$ .

$$x_{ij0} - x_{i+1j1} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n$$

4. Se no período  $i$ , o cultivo da soja ( $k = 1$ ) é desenvolvido na gleba  $j$ , então no seguinte período  $i + 1$ , na gleba  $j$ , deve ser desenvolvido o cultivo: Milho+Capim ( $k = 2$ ), ou Sorgo+Capim ( $k = 3$ ).

$$x_{ij1} - x_{i+1j2} - x_{i+1j3} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n$$

5. Se no período  $i$ , o cultivo Milho+Capim ( $k = 2$ ) é desenvolvido na gleba  $j$ , então no seguinte período  $i + 1$ , na gleba  $j$ , deve ser desenvolvido o cultivo da pastagem ( $k = 0$ ) ou o cultivo de Sorgo+Capim ( $k = 3$ ).

$$x_{ij2} - x_{i+1j0} - x_{i+1j3} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n$$

6. Se no período  $i$ , o cultivo de Sorgo+Capim ( $k = 3$ ) é desenvolvido na gleba  $j$ , então no seguinte período  $i + 1$ , na gleba  $j$ , deve ser desenvolvido o cultivo da pastagem ( $k = 0$ ) ou o cultivo de Milho+Capim ( $k = 2$ ).

$$x_{ij3} - x_{i+1j0} - x_{i+1j2} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n$$

### MODELO - ROTAÇÃO ÓTIMA DE CULTURAS AGRÍCOLAS

$$\text{Maximizar} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^3 P_{ijk} x_{ijk}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1 \quad k = 0, 1, 2, 3; i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{k=0}^3 x_{ijk} = 1 \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m \quad \text{Se } n = 4 \quad (2)$$

$$\sum_{k=0}^3 x_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m \quad \text{Se } n > 4$$

$$x_{ijk} + x_{i+1jk} \leq 1 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n; k = 0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$x_{ij0} - x_{i+1j1} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$x_{ij1} - x_{i+1j2} - x_{i+1j3} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{ij2} - x_{i+1j0} - x_{i+1j3} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$x_{ij3} - x_{i+1j0} - x_{i+1j2} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 0, 1 \quad i = 1, \dots, m-1; j = 1, \dots, n; k = 0, 1, 2, 3$$

É importante ressaltar que o número de restrições do modelo depende do número de regras impostas; do número de períodos, de cultivos e de glebas. Mais ainda, para  $p$ -cultivos, teremos um modelo de programação inteira binária com  $(pnm)$  –variáveis e  $(p^2nm)$  – restrições. Por tanto o modelo é dimensionalmente grande e daí que parece relevante pensar no desenvolvimento de alguma “meta-



heurística” (Dorigo, et al., 1999, Lacerda, et al., 1999), que nos permita avaliar a competição do melhor comportamento dos algoritmos na seleção das rotações de culturas em um determinado espaço-tempo. Desta maneira teríamos programas de fácil acesso e que podem auxiliar aos produtores rurais nas tomadas de decisões (inovação tecnológica).

### 3. Resultados e Discussão

A continuação apresenta-se um conjunto de ensaios numéricos gerados aleatoriamente, quando variamos o número de glebas ( $n = 4, 6, 8, 10$ ) e o número de períodos ( $m = 12, 9, 6, 3$ ), procurando acompanhar o desenvolvimento do modelo com mais dados. O modelo anterior foi resolvido utilizando o solver do MATLAB 7.4. Em todas as tabelas apresentadas pode-se observar que as restrições (1) e (2) são satisfeitas e indicam que em cada período, cada cultivo é desenvolvido (ou não) em uma e só uma gleba. Além disso, nenhum plantio é desenvolvido durante quaisquer dois períodos consecutivos; isto é, as restrições (3) são satisfeitas. Note que como exigem as restrições (4), para cada gleba; se em determinado período é desenvolvido o plantio da pastagem (PG), então no período seguinte é desenvolvido o plantio da soja (S).

Igualmente para cada gleba, se em um determinado período é desenvolvido o cultivo de soja, então no período seguinte deve ser desenvolvido o cultivo: Milho+Capim ou Sorgo+Capim. Por outra parte, se em um período se desenvolve o cultivo Milho+Capim, então no período seguinte deve ser desenvolvido a pastagem (PG) ou o cultivo Sorgo+Capim. Note que no caso em que  $n > 4$ , teremos glebas vazias. Em relação aos “pesos” e como foi dito, é possível estabelecer um critério fisiológico (baseado na adaptação e desenvolvimento de cada cultivo em uma determinada gleba e certo período), a partir do qual, podemos associar valores entre

zero e um a cada cultivo, indicando o percentual de vantagem que esse cultivo tem em relação ao resto, quando é desenvolvido nessa gleba e nesse período.

Neste trabalho tais valores foram determinados de forma aleatória, junto alguns ensaios numéricos que procuraram analisar a sensibilidade dos pesos no modelo. Para isso, estamos supondo que os pesos associados a cada cultivo sofrem perdas a cada determinado número de períodos (por exemplo, a cada três períodos); mais ainda, que a cada três períodos se têm um 25% de perda na adaptabilidade da pastagem em qualquer gleba, um 50% no caso da soja e 75% no caso do M+C e S+C. Utilizando nossa notação anterior, computacionalmente podemos escrever que para  $i \geq 4$  e  $j = 1, \dots, n$ ;  $n > 4$ :

$$p_{ij0} \leftarrow p_{ij0} - \frac{1}{4} p_{i-3j0}$$

$$p_{ij1} \leftarrow p_{ij1} - \frac{1}{2} p_{i-3j1}$$

$$p_{ij2} \leftarrow p_{ij2} - \frac{3}{4} p_{i-3j2}$$

$$p_{ij3} \leftarrow p_{ij3} - \frac{3}{4} p_{i-3j3}.$$

Observe que na Gleba 3 da Tabela 1, após ao desenvolvimento do plantio Milho+Capim, só segue a pastagem (PG). Também, se em determinado período temos Sorgo+Capim, então no seguinte período devemos ter Milho+Capim, salvo no décimo primeiro período da gleba 1 e no nono período da gleba 3. Nos períodos 3, 4, e 5, se na gleba 1 é desenvolvido o plantio k, então esse plantio será desenvolvido na gleba 4 no período seguinte. Note que a seqüência: Milho+ Capim, Pastagem, Soja; se faz presente em cada gleba. Já na Tabela 2, temos as glebas 3 e 6 vazias. Note que até o quinto

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

período; na gleba 1, temos o ciclo: Sorgo+Capim, Milho+Capim. Seguidamente entre o sexto e nono período, desenvolvesse cada um dos plantios; assim como nas demais glebas utilizadas.

Tabela 1: Calendário rotacional ótimo dos plantios  $k=0$  (Pastagem),  $k=1$  (S-Soja),  $k=2$  (Milho + Capim),  $k=3$  (Sorgo + Capim) para doze períodos e quatro glebas.

Período	G1	G2	G3	G4
1	Pastagem	Sorgo+Capim	Soja	Milho+Capim
2	Soja	Milho+Capim	Sorgo+Capim	Pastagem
3	Sorgo+Capim	Pastagem	Milho+Capim	Soja
4	Milho+Capim	Soja	Pastagem	Sorgo+Capim
5	Pastagem	Sorgo+Capim	Soja	Milho+Capim
6	Soja	Pastagem	Milho+Capim	Sorgo+Capim
7	Sorgo+Capim	Soja	Pastagem	Milho+Capim
8	Milho+Capim	Sorgo+Capim	Soja	Pastagem
9	Pastagem	Milho+Capim	Sorgo+Capim	Soja
10	Soja	Sorgo+Capim	Pastagem	Milho+Capim
11	Sorgo+Capim	Milho+Capim	Soja	Pastagem
12	Pastagem	Sorgo+Capim	Milho+Capim	Soja

Note que na gleba 2, como a soja é desenvolvida no primeiro período, então só pode ser desenvolvida novamente três períodos depois (quarto período). Também, seguindo a sexta regra imposta no modelo, o plantio Sorgo+Capim é seguido pela Pastagem.

No primeiro e segundo período da gleba 4, temos o cumprimento da terceira regra; logo da Pastagem, Soja. Note que só três períodos depois é que desenvolvemos novamente tal combinação. Também, Milho+Capim é desenvolvido no terceiro e sexto período. É importante ressaltar que salvo nos primeiros quatro períodos da gleba 1, em todas as glebas, o plantio de Sorgo+Capim é seguido da Pastagem; mais ainda, essa combinação é desenvolvida na gleba 5 nos períodos 4 e 8. Nas glebas 4 e 5, a sequência: Milho+Capim, Pastagem, Soja é recomendável no terceiro e primeiro período respectivamente.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Na Tabela 3, temos as glebas 1, 3, 7 e 8 vazias e no resto, pelo menos uma combinação Pastagem, Soja. Insistimos em que todos os plantios são realizados nos últimos quatro períodos de cada gleba. Note que na gleba 4 se recomenda o ciclo Sorgo+Capim, Milho+Capim nos primeiros três períodos como na gleba 1 da Tabela 2.

Na Tabela 4, as glebas 1, 3, 4, 6, 7 e 10 ficam vazias. Na gleba 2 não é recomendável o plantio Milho+capim, enquanto que na gleba 5, não é recomendável o plantio Sorgo+Capim. Na gleba 8 não é recomendável o plantio de Pastagem e exatamente três plantios diferentes são realizados em cada gleba.

Tabela 2: Calendário rotacional ótimo dos plantios  $k=0$  (Pastagem),  $k=1$  (Soja),  $k=2$  (Milho + Capim),  $k=3$  (Sorgo + Capim) para nove períodos e seis glebas.

Período	G1	G2	G3	G4	G5	G6
1	Sorgo+Capim	Soja		Pastagem	Milho+Capim	
2	Milho+Capim	Sorgo+Capim		Soja	Pastagem	
3	Sorgo+Capim	Pastagem		Milho+Capim	Soja	
4	Milho+Capim	Soja		Pastagem	Sorgo+Capim	
5	Sorgo+Capim	Milho+Capim		Soja	Pastagem	
6	Pastagem	Sorgo+Capim		Milho+Capim	Soja	
7	Soja	Pastagem		Sorgo+Capim	Milho+Capim	
8	Milho+Capim	Soja		Pastagem	Sorgo+Capim	
9	Sorgo+Capim	Milho+Capim		Soja	Pastagem	

Tabela 3: Calendário rotacional ótimo dos plantios  $k=0$  (Pastagem),  $k=1$  (Soja),  $k=2$  (Milho + Capim),  $k=3$  (Sorgo + Capim) para seis períodos e oito glebas.

Período	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1		Pastagem		Sorgo+Capim	Milho+ Capim	Soja		
2		Soja		Milho+Capim	Pastagem	Sorgo+Capim		
3		Milho+Capim		Sorgo+Capim	Soja	Pastagem		
4		Pastagem		Milho+Capim	Sorgo+Capim	Soja		
5		Soja		Pastagem	Milho+Capim	Sorgo+Capim		
6		Sorgo+Capim		Soja	Pastagem	Milho+Capim		

Tabela 4: Calendário rotacional ótimo dos plantios  $k=0$  (Pastagem),  $k=1$  (Soja),  $k=2$  (Milho + Capim),  $k=3$  (Sorgo + Capim) para três períodos e dez glebas.

Período	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
1		Sorgo+Capim			Pastagem			Soja	Milho+Capim	
2		Pastagem			Soja			Milho+Capim	Sorgo+Capim	
3		Soja			Milho+Capim			Sorgo+Capim	Pastagem	

Através dos resultados obtidos (Tabelas 2, 3, 4), pode-se observar que quando aumentamos o número de gleba em relação aos quatro plantios considerados, as glebas que no primeiro período tenham os pesos mais baixos para desenvolver qualquer dos plantios, ficam fora do conjunto de glebas que terão desenvolvimento dos plantios até o período final. Isso mostra o caráter seqüencial do conjunto de restrições impostas no modelo apresentado.

### **4. Conclusões**

Apresentamos um programa binário (PB) que simula a rotação de culturas e cuja solução representa um calendário ótimo dos plantios considerados na tecnologia de integração lavoura-pecuária, desenvolvida pela Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, MG), em uma área de 24 hectares. Em todas as tabelas apresentadas, as restrições (1)-(7) do programa foram satisfeitas. Uma característica do PB é ter, em geral, múltiplas soluções que podem aparecer; dentre outras possibilidades, quando é possível “rotacionar” a programação das  $n$  glebas para “frente” ou para “atrás” no tempo. O consórcio entre as culturas é o mais recomendável nas glebas geradas aleatoriamente, e isso é compatível com os resultados experimentais obtidos pela Embrapa.

### **Referencias**

Altieri, M.A. Agroecology: The science of sustainable agriculture. Westview Press, second edition, 1997, 448p.

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. *Pesq. Agropec. Bras.*, v.34,n.11,p.2029-2036, 1999.

Alvarenga, R.C.; Neto, M.M.G. Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) de corte da Embrapa Milho e sorgo. Ed. Embrapa, 6p, 2008.

Broch, D.L.; Borges, E.P. Integração agricultura-pecuária: Plantio direto da soja sobre pastagem na integração agropecuária. Maracaju: Fundação MS, Informativo Técnico, 24p, 01/1997.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Cattelan, A.J.; Gaudencio, C. De A.; Silva, T.A. Sistemas de rotação de culturas em plantio direto e os microrganismos do solo, na cultura da soja, em Londrina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, n.2, p.293-301, 1997.

Cunha, E.De Q.; Balbino, L.C.; Stone, L.F.; Leandro, W.M.; Oliveira, G.C. Influência de rotações de culturas nas propriedades físico-hídricas em um latossolo vermelho em plantio direto. *Engenharia Agrícola*, v.27, p.665-674, 2007.

Dorigo, M. & Di Caro, G.; The ant colony optimization meta-heuristic. In D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover, editors, *new ideas in optimization*, pages 11-32, Mc. Graw Hill, London, UK, 1999.

Detlefsen, N.; Jensen, A. L. Modeling optimal crop sequences using network flows. *Agricultural Systems* 94, 566-572, 2007.

Duarte, J.B.J.; Coelho, F.C. Rotação de culturas. *Manual técnico*, v. 1, p.147-155, 2002.

El-Nazer, T.; Mc Carl, B. A. The choose of crop rotation: A modeling approach and case study. *American Journal of Agricultural Economics*, 68 (1), 127-136, 1986.

Franchini, J.C.; Costa, J.M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná. *Embrapa Soja. Documento 327*, 47p., 2011.

Gliessman, S.R. *Agroecologia: Processos ecológicos em agricultura sustentável*. Porto Alegre: UFRGS, 2001, 653p.

Haneveld, W.K.; Stegeman, A.W. Crop Succession requirements in agricultural production planning. *European Journal of Operations Research*.166, p.406-429, 2005.

Hildreth, O. G.; Reiter, S. On the choice a crop rotation plans. In J. C. Koopmans (ed.) *proceeding held in Chicago-1949*, 177-188, 1951.

Kluthcouski, J.; Stone, L.F.; Aidar, H. *Integração Lavoura-Pecuária*. Embrapa. Equipe Sistemas Santa Fé, p.570, 2011.

Nemhauser, G.L.; Wolsey, L.A. 1. In: *Publication, W.I. (Ed). Integer and combinatorial optimization*. USA, p. 2-20, 1999.

Lacerda, E.G.M.; Carvalho, A.C.P.L. Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C.O., Valença, M.J.S. (org.) *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. p. 99-150. 1999.

Lemalade, J.L.; Nagih, A.; Plateau, G.A. MIP flow model for crop-rotation planning in a context of forest sustainable development In: *AnnalsofoperationsResearch* 190, p.149-164, 2011.

Santos, H.P.; Reis, E.M. *Rotação de culturas em plantio direto*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 212p, 2001.

Santos, L.M.R.; Santos R.H.; Arenales, M.N.; Raggi, L.A. Um modelo para a programação de rotação de culturas. *Pesq. Operacional*, v. 27, n.3, p.535-547, 2007.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Santos, L.M.R. Programação de rotação de culturas-modelos e métodos de solução. Tese de Doutorado, USP, 85 p. 2009.

Silveira, P.M.Da; Stone, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo.Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,v.7,n.2,p.240-244, 2003.