



## Otimização da mistura de herbicidas aplicados em diferentes concentrações considerando a resistência de plantas daninhas

Ulcilea Alves Severino Leal

Geraldo Nunes Silva,

Depto. Ciência da Computação e Estatística, IBILCE, UNESP,

15054-000, São José do Rio Preto, SP

ulcilea0803@hotmail.com, gsilva@ibilce.unesp.br,

Décio Karam

Embrapa Milho e Sorgo

35701-970, Sete Lagoas, MG

E-mail: karam@cnpms.embrapa.br

**Resumo:** O propósito deste trabalho é a aplicação de um modelo de otimização dinâmico para a determinação da mistura de herbicidas aplicados em diferentes concentrações. A densidade de sementes no início do plantio e a frequência dos alelos são tomadas como variáveis de estado e a variável de controle é expressa pela função de dose-resposta. O objetivo é determinar o percentual de cada concentração e a dosagem dos herbicidas a serem aplicados, com o intuito de obter uma maior eficácia no controle de plantas daninhas, buscando maximizar o lucro num período pré-determinado e retardar a evolução da resistência da planta daninha. O problema de otimização dinâmico foi resolvido por programação não-linear utilizando o método ASA\_CG. Resultados de simulações numéricas descrevem uma estratégia ótima para a aplicação de concentração de mistura dos herbicidas nicosulfuron e atrazine para controlar a infestação causada pela planta daninha Bidens subalternans referente os períodos de 5 e 10 anos.

**Palavras-chave:** Otimização, controle e resistência de plantas daninhas.

### 1 Introdução

A infestação por plantas daninhas é considerada um grande problema na agricultura, pois, gera perdas em diversos níveis e, por este motivo, busca-se controlá-las. A principal técnica utilizada para o controle em sistemas de produção tecnificados é a aplicação de defensivos químicos, porém a aplicação de herbicida para o controle de plantas daninhas gera custos significativos ao produtor e impactos ambientais. Assim, tem-se buscado modelos

matemáticos que descreve a dinâmica dessas plantas, com o intuito de melhor compreender a sua evolução e auxiliar na tomada de decisão em campo. Modelos de otimização para o controle da aveia selvagem numa colheita de grãos são apresentados em [6] e [5].

Um dos fatores relevante quando utiliza-se os defensivos químico como estratégia de controle é a resistência de plantas daninhas que ocorre em função de um processo evolutivo e o desenvolvimento de biótipos de plantas daninhas resistentes é imposto através da pressão de seleção causada pelo uso intensivo dos herbicidas.

A aplicação sequencial de dois herbicidas diferentes, mas com o mesmo mecanismo de ação, tem um efeito semelhante à aplicação repetitiva de um dos herbicidas isoladamente, pois, ambos exercem pressão de seleção semelhante na população. Assim, a mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação é importante para retardar o aparecimento de biótipos resistentes e, com isso, ter uma eficácia maior no controle de plantas daninhas e uma melhor utilização dos produtos estará em curso.

As funções de frequência genética do alelos dominantes e recessivos em face da pressão seletiva imposta pelo herbicida seguem os princípios da genética populacional descrita segundo [1].

O objetivo deste trabalho é a aplicação de um modelo de otimização dinâmico, considerando a de mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação aplicados em diferentes concentrações, para retardar o aumento da resistência, reduzir o uso de herbicidas e maximizar o lucro num período pré-determinado de tempo.



## 2 O problema de otimização

As plantas daninhas competem rigorosamente com as colheitas, resultando em grande perda de rendimento, pois essas plantas possuem um alto poder de reprodução, gerando um grande número de sementes, afetando diretamente o tamanho do banco de sementes no solo.

O modelo que descreve a dinâmica populacional para as plantas daninhas é descrito segundo [6]:

$$\begin{aligned} y_t &= x^g \delta x_t \\ y_t^a &= (1 - \rho_i(u_t^i)) y_t \\ x_t^r &= \exp[\gamma \ln y_t^a / (\mu + \varepsilon \ln y_t^a)] \\ x_t^n &= \kappa x_t^r - \eta + \xi \\ x_{t+1} &= x_t^n + (1 - \Psi)(1 - \delta)x_t, \end{aligned} \quad (1)$$

no qual, variáveis e parâmetros estão definidos na Tabela (1) e  $i = 1, \dots, l$  é o tipo de herbicida aplicado. A taxa de mortalidade induzida pelo herbicida  $i$ ,  $\rho_i(u_t^i)$ , é de fundamental importância. Esta descreve a relação entre a dose de herbicida  $i$  e a resposta da planta, ou seja, quantifica a sensibilidade da planta daninha ao herbicida, no qual plantas resistentes têm uma menor sensibilidade ao herbicida.

A função de dose-resposta do herbicida  $i$  é dada segundo [8] por:

$$\rho_i(u_t^i) = c + \frac{d - c}{1 + \exp[b(\ln(u_t^i) - \ln(GR_{50i}))]},$$

em que  $c$  é o limite inferior da curva que corresponde às respostas médias com doses altas de herbicidas,  $d$  é o limite superior da curva que corresponde à resposta média da testemunha,  $b$  é a declividade da curva em torno de  $GR_{50i}$ , que corresponde à dose necessária do herbicida  $i$  para reduzir 50% do crescimento da planta daninha em relação a testemunha.

A resistência pode ser interpretada como uma diminuição significativa da eficiência do herbicida sobre plantas específicas, o fator  $GR_{50i}$  é utilizado para medir a eficiência do herbicida.

O modelo que descreve o comportamento da evolução da resistência  $GR_{50i}$ , descrito por [10], é expresso da seguinte forma:

$$GR_{50i}(R_t^i) = R_t^i GR_{50R}^i + (1 - R_t^i) GR_{50S}^i,$$

no qual,  $GR_{50R}^i$  e  $GR_{50S}^i$  corresponde à dose necessária do herbicida  $i$  para a redução de 50% da resposta da planta daninha resistente,  $R$ ,

e suscetível,  $S$ , respectivamente, e  $R_t^i$  é a resistência ao herbicida  $i$  no tempo  $t$ , a qual é obtida em função da frequência dos alelos.

Os conceitos de Mendel e o equilíbrio de Hardy-Weinberg, presentes em [1], são utilizados por [10] para obter a relação do alelo com o genótipo. No caso de alelo dominante a proporção de indivíduos resistentes pode ser obtida através por:

$$R_t^i = (p_t^i)^2 + 2p_t^i(1 - p_t^i).$$

no qual,  $p_t^i$  é a frequência de alelo dominante, apresentada posteriormente na Equação (2).

Para o caso em que os alelos possuem resistência dominante nuclear, a função Fisher-Haldane-Wright (FHW) que descreve a frequência dos alelos apresentada em [10] é:

$$p_{t+1}^i = p_t^i + s(u_t^i) p_t^i q_t^i \frac{q_t^i}{1 + s(u_t^i) R_t^i} \frac{x_t^n}{x_t}, \quad (2)$$

no qual,  $s$  é o coeficiente de pressão seletiva.

Assim, o modelo dinâmico para a densidade de sementes, representado por  $g_i(x_t, p_t^i, u_t^i)$ , é obtido pelo sistema de Equação (1) de forma recursiva substituindo cada termo, e considerando  $GR_{50}^i(R_t^i)$  em vez de  $GR_{50}^i$  na função de dose-resposta  $\rho_i(u_t^i)$  resultando em  $\rho_i(u_t^i, R_t^i)$ , e o modelo para a frequência dos alelos, representado por  $v_i(x_t, p_t^i, u_t^i)$ , é dado pela Equação (2).

O campo vetorial, que representa a velocidade de evolução da dinâmica, é escolhido a partir de um conjunto  $\{(g_i, v_i); i = 1, \dots, l\}$  em que cada elemento representa o campo de evolução conjunta da densidade de sementes e da frequência de alelos quando utilizado um único tipo de herbicida.

Considera-se a seguinte função de produção dada segundo [10] e [6] :

$$\begin{aligned} Y_i &= Y_0(1 - Y_L)(1 - Y_p) \\ Y_L &= \frac{a(x_t(1 - \rho_i(u_t^i, R_t^i)))}{1 + \frac{a}{m}(x_t(1 - \rho_i(u_t^i, R_t^i)))}. \end{aligned}$$

no qual,  $Y_0$  e  $Y_p$  são a perda de rendimento na produção livre de plantas daninhas e a perda de rendimento devido à ação tóxica do produto químico, respectivamente,  $a$  é a perda de rendimento causada a cada adição de uma planta daninha e  $m$  é a perda de rendimento de plantas daninhas quando a densidade tende ao infinito.

A função de lucro para o problema no qual



deseja-se determinar a dosagem e a concentração ótima do herbicida aplicado na lavoura levando em consideração a resistência da planta daninha e o custo de produção, é dada por:

$$\pi_i(x_t, p_t^i, u_t^i) = P_y Y_i(x_t, p_t^i, u_t^i) - P_u^i u_t^i - C^i(t),$$

no qual,  $P_y^i$  e  $P_u^i$  são o preço de cada unidade do produto e do controle  $i$  (R\$ tonelada<sup>-1</sup>), respectivamente, e  $C^i$  é a constante dos custos de aplicação do controle  $i$  e produção.

O intuito deste trabalho é avaliar as variações na densidade de plantas daninhas na lavoura a partir da aplicação de mistura de herbicidas em diferentes concentrações, visando obter a maior lucratividade. Para tal propósito, toma-se como variáveis a população de plantas daninhas,  $x_t$ , a frequência dos alelos,  $p_t^i$ , a dosagem de cada herbicida,  $u_t^i$ , e o percentual da dosagem referente a cada herbicida utilizado,  $\lambda_t^i$ .

O problema de otimização considerando a mistura de herbicidas em diferente concentrações é modelado por:

$$\begin{aligned} & \max_{u_t^i, \lambda_t^i} \sum_{i=1}^l \sum_{t=0}^T \lambda_t^i \alpha^t \pi_i(x_t, p_t^i, u_t^i) \\ & \text{sobre o processo } (x_t, p_t^i, u_t^i, \lambda_t^i) \text{ satisfazendo} \\ & x_{t+1} = \sum_{i=1}^l \lambda_t^i g_i(x_t, p_t^i, u_t^i) \\ & p_{t+1}^i = v_i(x_t, p_t^i, u_t^i) \\ & x(0) = x_0 \\ & p^i(0) = p_0^i \\ & \sum_{i=1}^l \lambda_t^i \frac{10^{-6}}{A^i} \leq \sum_{i=1}^l u_t^i \leq \sum_{i=1}^l \min \left\{ u_{max}^i, \frac{0,5}{A^i} \right\} \lambda_t^i \\ & \sum_{i=1}^l \lambda_t^i = 1, \quad \lambda_t^i \in [0, 1] \quad t = 0, \dots, T. \end{aligned}$$

no qual,  $\alpha$  é um fator de desconto dado segundo [7],  $x_0$  e  $p_0^i$  são as condições inicial,  $A$  um coeficiente de ajuste e  $u_{max}^i$  é a dose máxima do herbicida  $i$  permitido em campo.

Dado que o problema em questão possui restrições sobre a variáveis de controle na forma de limitantes inferiores e superiores, um método de programação não-linear para variáveis restritas deve ser adotado. Assim, foi utilizado o método ASA.CG proposto por [4], disponível em [3]. Este método consiste da combinação

do gradiente conjugado e gradiente projetado e possui garantia de convergência global.

### 3 Resultados e discussões

Nesta seção é apresentado um estudo de caso da planta daninha *Bidens subalternans*, presente na cultura do milho, com aplicação de controle através dos herbicidas nicosulfuron e atrazine, herbicidas com diferentes mecanismo de ação, aplicados isoladamente e em concentração de mistura. Busca-se a melhor forma de combater a infestação e retardar a evolução da resistência, buscando obter a melhor lucratividade possível com reduzido comprometimento ambiental.

Os valores dos parâmetros econômicos utilizados para a cultura do milho safra 2009/2010, do modelo populacional e do modelo da dose-resposta encontram-se em [9]. Os coeficientes técnicos de produção e o custo do cultivo do milho, safra 2009/2010 foram obtidos de [2], os dados referentes ao modelo populacional foram obtidos de [6], e os experimentos para determinar os parâmetros das funções de dose-resposta foram conduzidos em casa de vegetação na Embrapa Milho e Sorgo de Sete Lagoas-MG, no qual as sementes foram disponibilizadas pelo Dr. Dionisio Gazziero da Embrapa Soja de Londrina-PR.

Foi avaliado o desenvolvimento do banco de sementes, da dinâmica da resistência, através da frequência dos alelos, do percentual da taxa ótima de concentração de mistura dos herbicidas e da dose ótima dos herbicidas para o período de 5 e 10 anos, com condição inicial do banco de sementes de 500 sementes  $m^{-2}$  e as frequências dos alelos 0,1 para ambos mecanismo de ação. Essa frequência indica um percentual de indivíduos resistentes na população, próximo ao índice detectável agronomicamente.

Os resultados foram obtidos utilizando o método ASA.CG, a implementação computacional foi feita em linguagem de programação C e os testes foram executados em um microcomputador Intel Corel i3, com 4 GB de memória RAM.

A seguir, apresentam-se os resultados quando utiliza a aplicação dos herbicidas separadamente, isto é, apenas o nicosulfuron ou a atrazine, e em mistura, quando utiliza o nicosulfuron e a atrazine em diferentes concentrações de mistura dos mesmos.

As Figuras 1(a) e 3(a) trazem o valor ótimo do banco de sementes,  $x^*$ , este sofre um decréscimo significativo com o passar do tempo nos três casos avaliados, independente



do período da simulação. Quando utilizou-se apenas a atrazine, na simulação de 10 anos, obteve-se um pequeno aumento no banco de sementes após o quinto ano. Esse aumento é coincidente com as baixas doses do produto aplicadas nesse período (ver Figura 3(d)), estabilizando a frequência de alelos a partir do quinto ano (ver Figura 3(b)).

Já as Figuras 1(b) e 3(b) trazem a evolução da resistência da planta daninha com o passar do tempo, através de  $p^*$ . No caso da utilização de mistura a frequência dos alelos resistentes é apresentada separadamente para cada herbicida, apontados nas figuras 1(b) e 3(b) por mistura  $i = 1$  e mistura  $i = 2$ , para os herbicidas nicosulfuron e atrazine, respectivamente. Houve um decréscimo significativo da frequência dos alelos do biótipo resistente quando utilizada a mistura de herbicidas em concentrações variadas nos diferentes anos, comparado com os casos em que os herbicidas são utilizados separadamente.

Nas Figuras 1(c) e 3(c) apresenta-se a taxa ótima da concentração de mistura de herbicidas,  $\lambda^*$ , para um horizonte de 5 e 10 anos, respectivamente. As Figuras 1(d) e 3(d) apresentam as doses ótimas dos herbicidas para os três casos avaliados, para um horizonte de 5 e 10 anos, respectivamente. Quando aplicou-se a técnica de mistura de herbicidas visando a otimização do lucro houve a necessidade de menores doses de nicosulfuron, em relação a aplicação do mesmo isolado, exceto na sexta aplicação (ano 5), para simulação de 10 anos.

Nas Figuras 2 e 4 expõem-se o lucro ótimo obtido no último ano para cada um dos casos avaliados e o lucro de produção de uma lavoura de milho saia 2009/2010. Observa-se, que ao utilizar a técnica de concentração de mistura obtém-se um lucro de R\$914,86 e de R\$951,87 no quinto e décimo ano, respectivamente, resultados esses significativamente superior em relação à utilização do nicosulfuron isoladamente que obteve um lucro de R\$815,78 e de R\$815,95 nesse período. Essa técnica também ocasionou no retardo da evolução da resistência, nos dois períodos apresentados. De fato, o percentual da resistência da planta daninha referente a aplicação do nicosulfuron isoladamente é de 0,53 e de 0,75 no quinto e décimo ano, respectivamente, já quando utiliza-se a concentração de mistura o percentual da resistência referente ao nicosulfuron cai para 0,33 e de 0,49 nesse período.

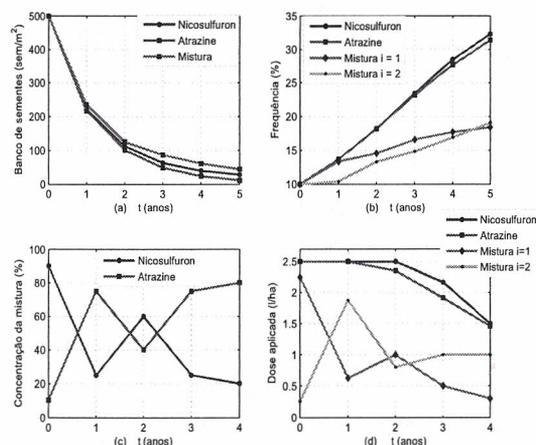


Figura 1: Resultados da otimização mistura de herbicidas para um horizonte de 5 anos.

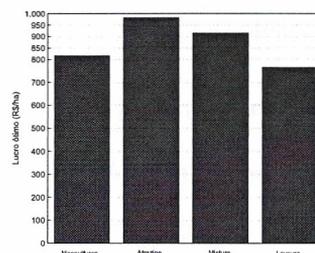


Figura 2: Lucro no 5º ano.

## 4 Conclusão

A partir do momento que se leva em consideração como estratégia de controle a concentração de mistura de herbicidas, obtém-se um maior retorno financeiro e possibilita retardar a dinâmica da resistência da planta daninha comparada a aplicação isolada de cada um dos herbicidas. Portanto, o uso da concentração da mistura de herbicida mostra-se eficiente quando levado em consideração a resistência da planta daninha.

## 5 Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo CNPq, processos 133180/2011-5 e 305418/2009-2, e pela FAPESP processo 2009/18643-0.

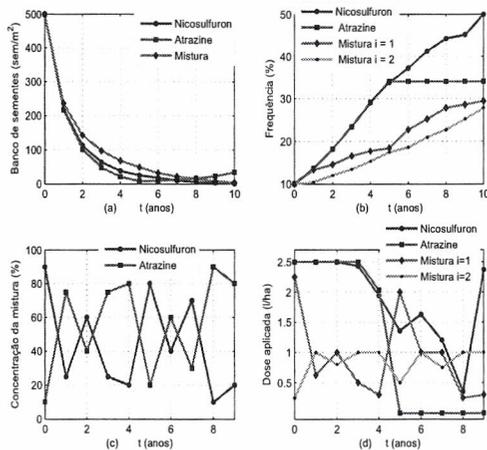


Figura 3: Resultados da otimização mistura de herbicidas para um horizonte de 10 anos.

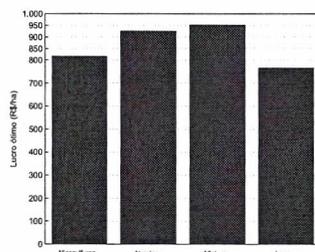


Figura 4: Lucro no 10º ano.

- [5] R. Jones. Sustainability and integrated weed management in australian winter cropping systems: A bioeconomic analysis. In *49th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economic Society*, pages 1–15, 2005.
- [6] R. Jones and O. J. Cacho. A dynamic optimisation model of weed control. In *44th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economics*, pages 1–17, 2000.
- [7] John O. S. Kennedy. *Dynamic Programming: Applications to Agriculture and Natural Resources*. Elsevier, New York, NY, 1986.
- [8] S. S. Seefeldt, J. E. Jensen, and E. P. Fuerst. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology*, 9(1):218–227, 1995.
- [9] U. A. Severino-Leal. Otimização vetorial e técnicas de mistura de herbicidas aplicadas ao controle de plantas daninhas. Master's thesis, IBILCE-UNESP, São José do Rio Preto, SP, 2012.
- [10] E. W. Stiegelmeier, P. A. Munari, H. S. Kajino, V. A. Oliveira, and G. N. Silva. Modelo de otimização da aplicação de herbicida para o controle de plantas daninhas considerando a evolução da resistência. In *XVIII Congresso Brasileiro de Automática, SBA*, pages 886–893, 2010.

## Referências

- [1] N. F. Britton. *Essential Mathematical Biology*. Springer Undergraduate Mathematics Series, London, UK, 2003.
- [2] D. L. Broch and Roney S. Pedroso. Custo de produção da cultura do milho. <http://www.fundacaoms.org.br/irequest.php118>, Acessado em dezembro 2009.
- [3] W. W. Hager. Source code for ASA-CG version 1.3. <http://www.math.ufl.edu/~hager/papers/Software>, Acessado em novembro 2010.
- [4] W. W. Hager and H. Zhang. A new active set algorithm for box constrained optimization. *Journal of Optimization*, 17(2):526–557, 2006.



Tabela 1: Definição dos parâmetros e variáveis do modelo populacional

$x_t$	Densidade do banco de sementes ( $m^{-2}$ ) no início do ano $t$
$p_t$	Frequência do alelo dominante no ano $t$
$q_t$	Frequência do alelo recessivo no ano $t$
$y_t$	Densidade de plantas daninhas jovens ( $m^{-2}$ ) no ano $t$
$y_t^a$	Densidade de plantas daninhas emergentes ( $m^{-2}$ ) que chegam à fase adulta
$x_t^r$	Densidade de sementes ( $m^{-2}$ ) resultantes da reprodução da planta daninha
$x_t^n$	Novas sementes adicionadas ao banco de sementes ( $m^{-2}$ ) no ano $t$
$x_t^g$	Porcentagem de sementes germinadas que emergiram ( $m^{-2}$ )
$\delta$	Taxa de germinação anual das sementes da planta daninha
$\gamma, \mu, \varepsilon$	Coefficientes de $x_t^r$
$\kappa$	Taxa de sobrevivência de novas sementes
$\eta$	Retirada de sementes na colheita
$\xi$	Importação de sementes (vento, pássaros, etc)
$\Psi$	Índice de mortalidade de sementes dormentes