Agricultura 4.0 e o manejo de plantas daninhas: modelos para recomendação de herbicidas aplicados na pré-emergência

Beatriz Alves Welk[1], Brunna de Carvalho Caetano[2], Matheus de Freitas Souza[3]

[1] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica - PIVIC.
[2] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica - PIVIC.
[3] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica – PIVIC.

.

Reitor:
Prof. Me. Alberto Barella Netto

Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação:
Prof. Dr. Carlos César E. de Menezes

Editor Geral:
Prof. Dra. Andrea Sayuri Silveira Dias Terada

Editores de Seção:
Profa. Dra. Ana Paula Fontana
Prof. Dr. Hidelberto Matos Silva
Prof. Dr. Fábio Henrique Baia
Pra. Dra. Muriel Amaral Jacob
Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza
Prof. Dr. Warley Augusto Pereira

Fomento:
Programa PIBIC/PIVIC UniRV/CNPq 2022-2023

Resumo: A determinação precisa das doses de herbicidas pré-emergentes desempenha um papel fundamental na agricultura, sendo influenciada pela capacidade de retenção do solo. No entanto, as atuais recomendações frequentemente se baseiam apenas na textura e matéria orgânica do solo, negligenciando outros atributos. O objetivo da pesquisa foi avaliar a eficácia das análises multivariadas na classificação de solos de acordo com suas respostas às doses da mistura de herbicidas. Amostras de solo foram coletadas em diversas regiões do centro-oeste brasileiro e submetidas a análises físicas e químicas detalhadas. Um experimento foi conduzido, aplicando doses crescentes da mistura de flumioxazina + imazetapir, com o sorgo utilizado como planta bioindicadora. Análises estatísticas, incluindo correlação, análise de componentes principais, análise fatorial e *cluster*, foram empregadas para identificar os atributos do solo mais relevantes para as respostas às doses de herbicidas. Os atributos do solo que mais influenciaram as respostas às doses de herbicidas foram Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, M.O, silte, Ca/K e Mg/CTC. A análise de agrupamento *k-means* separou os solos em dois clusters distintos, com diferentes níveis de sensibilidade ao herbicida e características do solo. O cluster com pH mais baixo apresentou uma maior dose necessária para causar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo, indicando uma maior sorção do herbicida em solos com pH mais baixo e maior teor de argila. As análises multivariadas são eficazes na categorização de solos com base em suas respostas às doses da mistura de herbicidas flumioxazina + imazetapir.

Palavras-Chave: Análise multivariada. Zethemaxx®. Dose.

Agriculture 4.0 and weed management: Models for pre-emergence herbicide recommendation.

Abstract: *The precise determination of pre-emergence herbicide doses plays a crucial role in agriculture, influenced by soil retention capacity. However, current recommendations often rely solely on soil texture and organic matter, neglecting other attributes. The research aimed to evaluate the effectiveness of multivariate analyses in classifying soils based on their responses to herbicide doses. Soil samples were collected from various regions in the Brazilian Midwest and underwent detailed physical and chemical analyses. An experiment was conducted, applying increasing doses of the flumioxazin + imazethapyr mixture, with sorghum used as a bioindicator plant. Statistical analyses, including correlation, principal component analysis, factor analysis, and clustering, were employed to identify the soil attributes most relevant to herbicide dose responses. The soil attributes that most influenced responses to herbicide doses were Ca+Mg, P, pH, Na, CEC, OC, silt, Ca/K, and Mg/CEC. K-means clustering separated the soils into two distinct clusters, with different levels of herbicide sensitivity and soil characteristics. The cluster with lower pH required a higher dose to cause 80% intoxication in sorghum plants, indicating greater herbicide sorption in soils with lower pH and higher clay content. Multivariate analyses are effective in categorizing soils based on their responses to the flumioxazin + imazethapyr herbicide mixture doses.*

Keywords: *Multivariate Analysis.* Zethemaxx®*. Dose.*

Introdução

A capacidade de retenção dos solos é considerada durante a recomendação das doses aplicadas dos herbicidas pré-emergentes. No entanto, os parâmetros que determinam a dose aplicação considera indiretamente e superficialmente a capacidade de retenção do herbicida no solo. Atualmente, as bulas de produtos formulados consideram apenas a textura e matéria orgânica do solo para definir a mínima e máxima dose aplicada, desconsiderando demais atributos físico-químico que afetam diretamente a sorção e dessorção dos herbicidas. Propriedades como pH (das Chagas *et al*., 2020), CTC (Silva *et al*., 2019) e mineralogia (Carneiro *et al*., 2020) já demostraram alta relação com a capacidade de sorção e dessorção de herbicidas nos solos. Portanto, doses baseadas apenas em dois atributos do solo podem gerar recomendações incorretas dos herbicidas quanto a sua quantidade aplicada, resultando em ineficiência no controle (subdosagem) ou contaminação ambiental (superdosagem).

Uma alternativa para determinação da sorção de um herbicida no solo é a avaliação através de ensaios biológicos. Nessa metodologia, a razão de sorção de um solo é analisada de forma comparativa entre os solos e um material inerte (sem capacidade de retenção do herbicida), usando a intoxicação de plantas extremamente sensíveis ao herbicida para o cálculo da razão de sorção (Guerra *et al*., 2014). O método biológico tem como principal vantagem comparado ao analítico a sua simplicidade e baixo custo. Além disso, o método biológico considera o componente biológico, no caso a planta, para inferir sobre a disponibilidade de herbicida disponível para controle de plantas daninhas (Gheno *et al*., 2016). Para determinados herbicidas, a sensibilidade da planta indicadora pode permitir a detecção de concentrações inferiores comparado a alguns métodos analíticos (Faria *et al*., 2018).

Apesar da maior simplicidade e menor custo do método biológico para estimar a sorção, essa metodologia demanda tempo e treinamento específico de pessoas para sua implementação. Desta maneira, tanto o método analítico e o biológico são raramente usados por produtores, técnicos e engenheiros agrônomos para definir as doses de herbicidas pré-emergentes. Uma solução para o uso restrito dos índices de retenção de herbicidas no solo pode ser a modelagem de dados. Muitos estudos usaram estatísticas multivariadas, regressões lineares múltiplas e sistemas de aprendizado de máquina para estimar estes índices com base em atributos do solo (Xu *et al*., 2016). O objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial da combinação de análises multivariadas para separar grupos de solos com padrão similar para doses da mistura de herbicidas flumioxazina + imazetapir.

Material e Métodos

Solos foram coletados em diferentes estados do centro-oeste brasileiro devido a maior participação dessa região na produção de soja. As amostras foram obtidas na camada de 0-20 cm, em locais sem histórico de aplicação de herbicidas. Os solos foram secos ao ar, peneirados em malha de 2 mm e caracterizados fisicamente e quimicamente (Silva *et al*., 2009). Um total de 10 amostras de diferentes solos foram obtidas.

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizados com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos pelos solos (10 solos) e doses crescentes de flumioxazina + imazetapir (Zethemaxx®). A unidade experimental foi um vaso com capacidade volumétrica de 0,5 dm^3. Os vasos foram preenchidos com 400 g de cada solo. O mesmo procedimento foi adotado para o substrato inerte. Após o preenchimento dos vasos, a espécie de planta indicadora para cada flumioxazina + imazetapir foi semeada em cada unidade experimental. Três plantas por unidade experimental foram cultivadas por 21 dias após a aplicação de cada flumioxazina + imazetapir. A espécie bioindicadora foi o sorgo (*Sorghum bicolor*).

Após o preenchimento das unidades experimentais com solo, a umidade foi mantida na capacidade de campo, determinada previamente para cada solo. Após esse procedimento, o herbicida flumioxazina + imazetapir foi aplicado sobre a superfície do solo na pré-emergência na planta indicadora. As doses aplicadas foram definidas com base na dose recomendada pela bula comercial do herbicida (0; 0,25; 0,5; 1 e 1,5x a dose máxima recomendada). A intoxicação das plântulas foi avaliada aos 21 dias após a aplicação (DAA).

Modelos não-lineares hiperbólicos foram aplicados aos dados para obtenção da dose necessária para causar 80% de intoxicação das plantas de sorgo (dados não mostrados). Os atributos do solo foram submetidos a análise de correlação, componentes principais, fatorial e *cluster*. As médias e desvio padrão (média ± desvio padrão) para a dose necessária para proporcionar 80% de intoxicação no sorgo para cada grupo foram calculadas.

Resultados e Discussão

A análise de correlação permitiu selecionar alguns atributos do solo baseado na alta correlação entre si. Variáveis com alta correlação entre si pode resultar em problemas de multicolinearidade (das Chagas *et al*., 2020). Os atributos selecionados foram: Ca+Mg, S, P, pH, Na, capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (M.O), argila, silte, Ca/Mg, Ca/K, Mg/CTC e K/CTC. Os demais atributos do solo apresentaram alta correlação com os atriburos citados anteriormente, por isso foram excluídas da Análise de Componentes Principais (ACP) (dados não mostrados). A partir dos atributos selecionados, a ACP foi executada, resultado em cinco componentes principais com autovalores superiores a 1 (dados não mostrados). Desta maneira, cinco fatores foram usados para aplicação da Análise Fatorial (AF).

Os atributos do solo com maior importância segundo AF (cargas fatorias >0,80) foram: Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, M.O, silte, Ca/K e Mg/CTC (Tabela 1). Consequentemente, esses atributos possuem maior capacidade de explicar as variações entre os solos estudados. Estudos indicam que as variáveis com maior importância segundo a AF possuem alto potencial para agrupar grupos de indivíduos com maior similaridade entre si. Desta maneira, os atributos do solo com maior importância pela AF foram usadas para agrupar os solos pela análise *cluster*.

Tabela 1 – Importância dos atributos do solo em cada fator segundo análise fatorial considerando a rotação varimax

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Ca+Mg	0.34	0.88	0.24	-0.20	0.12
S	0.24	-0.27	-0.17	0.62	0.59
P	0.01	-0.10	0.02	-0.07	-0.98
pH	0.83	0.01	0.07	0.30	0.46
Na	0.03	-0.17	-0.97	0.06	0.05
CTC	-0.30	0.84	0.21	-0.16	-0.33
M.O	0.27	0.89	0.12	0.09	0.12
Argila	0.25	0.22	0.48	0.74	0.01

Silte	0.88	0.40	-0.06	0.04	-0.17
Ca/Mg	0.44	-0.11	0.05	0.73	0.42
Ca/K	0.16	0.80	-0.54	-0.12	-0.07
Mg/CTC	0.09	0.20	0.14	-0.95	-0.01
K/CTC	0.32	-0.54	0.48	0.18	0.56

* valores destacados em vermelho indicam os atributos com maior importância pela análise fatorial. * Critério varimax foi adotado para rotação dos fatores.
Fonte: autoria própria

A análise de agrupamento *k-means* separou dois grupos com maior similaridade para os atributos Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, M.O, silte, Ca/K e Mg/CTC. Os atributos com maior diferença entre os grupos (cluster 1 e cluster 2) foram pH, M.O e silte (Figura 1). Os grupos formados pela *k-means* também apresentaram diferenças para a dose necessária para provocar 80% de intoxicação das plantas de sorgo. O cluster 1 mostrou uma dose média igual a 0,51 ± 0,57 g ha-1 para causar 80% de intoxicação do sorgo. Por outro lado, o cluster 2 mostrou uma menor média para dose necessária para provocar 805 de intoxicação na planta indicadora, com valor médio igual a 0,12 ± 0,02 g ha-1 (Figura 1).

A maior dose necessária no cluster 1 pode estar relacionada a menor média de pH desses solos. Solos com menor pH tendem a elevar a sorção do imazetapir. Em menor pH do solo, o imazetapir tende a permanecer em seu estado molecular, permitindo maior sorção. Para solos com maior pH, cluster 2, a molécula do imazetapir adquirir carga residual negativa, diminuindo a sorção devido a repulsão dessas moléculas pelas cargas negativas do solo (das Chagas *et al.*, 2020, Carneiro *et al.*, 2020).

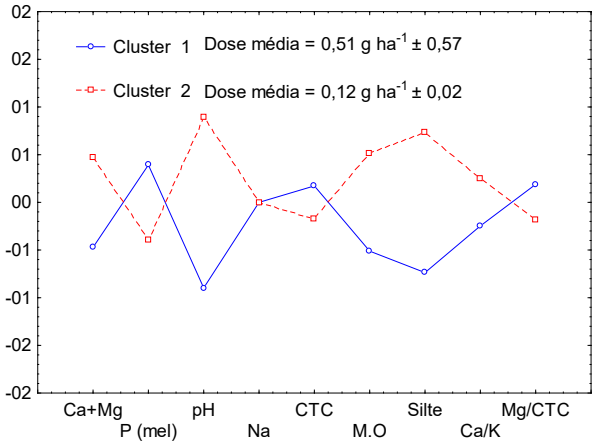

Figura 1 – Médias para os atributos do solo e dose (média ± desvio padrão) de cada grupo obtido a partir das variáveis mais importantes pela análise fatorial segundo agrupamento *k-means*
Fonte: autoria própria

O menor valor de silte e maior CTC para cluster 1 sugere que esse solos possuem maior teor de argila. Solos argilosos tendem a adsorver o imazetapir, reduzindo a disponibilidade do herbicida para controle de plantas daninhas. Esse fato também pode ter contribuído para maior dose necessária nos solos do cluster 1 para causar 80% de intoxicação das plantas de sorgo.

Conclusão

A combinação das análises de componentes principais, fatorial e *cluster* são capazes de agrupar solos com padrão similar para a dose necessária da mistura flumioxazina + imazetapir para causar 80% de intoxicação na planta bioindicador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de Rio Verde, ao Programa de Pós-Graduação de Produção Vegetal da UniRV e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte a execução do projeto.

Referências Bibliográficas

CARNEIRO, G. D. O. P. *et al*. Herbicide mixtures affect adsorption processes in soils under sugarcane cultivation**. Geoderma**, v. 379, p. 114626, 2020.

DAS CHAGAS, P. S. F. *et al*. increases in pH, Ca^{2+}, and Mg^{2+} alter the retention of diuron in different soils. **Catena,** v. 188, p. 104440, 2020.

FARIA, A. T. *et al*. Tebuthiuron leaching in three brazilian soils as affected by soil pH. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 5, p. 1-12, 2018.

GHENO, E. A. *et al*. Residual activity of herbicides applied to cotton on crops cultivated in succession. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 1, p. 143-152, 2016.

GUERRA, N. *et al*. Sensibility of plant species to herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 609-617, 2014.

SILVA, F. C. S. *et al*. (ED.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2009.

SILVA, T. S. *et al*. Use of neural networks to estimate the sorption and desorption coefficients of herbicides: a case study of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl in brazil. **Chemosphere**, v. 236, p. 124333, 2019.

XU, X. *et al*. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: results from data-assimilation analysis. **Geoderma**, v. 262, p. 235-242, 2016.