

VALDINEI ARAÚJO GONÇALVES

**DINÂMICA DO INDAZIFLAM EM SOLOS DO BRASIL AVALIADA PELAS
TÉCNICAS DA PLANTA INDICADORA E CROMATOGRAFIA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

G635d
2018
Gonçalves, Valdinei Araújo, 1987-
Dinâmica do indaziflam em solos do Brasil avaliada pelas técnicas da planta indicadora e cromatografia / Valdinei Araújo Gonçalves. – Viçosa, MG, 2018.
viii, 56 f. ; 29 cm.

Orientador: Lino Roberto Ferreira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Movimentos de herbicida. 2. Impacto ambiental.
3. Indaziflam (Herbicida). I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.


CDD 22. ed. 631.41

VALDINEI ARAÚJO GONÇALVES

**DINÂMICA DO INDAZIFLAM EM SOLOS DO BRASIL AVALIADA PELAS
TÉCNICAS DA PLANTA INDICADORA E CROMATOGRAFIA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

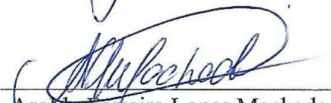
APROVADA: 26 de fevereiro de 2018.



Leonardo d'Antonino



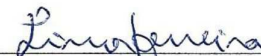
Silvério de Paiva Freitas



Aroldo Ferreira Lopes Machado



Francisco Claudio Lopes de Freitas
(Coorientador)



Lino Roberto Ferreira
(Orientador)

À minha filha Maria Luíza, minha esposa
Amália e aos meus pais Jose Carlos e Maria Aparecida,
pessoas que inspiram e alegam minha vida.

Dedico.

Agradeço a Deus por ter me conduzido com saúde e sabedoria até a conclusão de mais essa etapa da minha vida.

À minha esposa Amália Santos da Silva Gonçalves, minha força e minha luz, por estar sempre ao meu lado ajudando a tomar as decisões mais corretas, e também por ter me presenteado com uma coisa mais linda, nossa filha, Maria Luiza da Silva Gonçalves.

Ao meu pai, minha mãe e meu irmão, que sempre torceram pela minha vitória.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do doutorado e pela contribuição à minha formação acadêmica.

Ao programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFV pela oportunidade de poder aprimorar meus conhecimentos.

Ao professor Lino Roberto Ferreira pela orientação, confiança e valiosos ensinamentos, desde 2009, aprendi muito ao longo desses anos todos.

Aos professores Antônio Alberto da Silva e Francisco Cláudio Lopes de Freitas pelas valiosas sugestões.

À Bayer CropScience por ter fornecido o herbicida, os solos e apoio financeiro para a condução dessa pesquisa.

Agradeço a todos integrantes do grupo em Manejo Integrado de Plantas Daninhas pelos ótimos anos de convivência e amizade. Agradeço a todos vocês pela ajuda e terei sempre muito orgulho de ter feito parte dessa equipe.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de Bolsa de Estudo.

A quem torceu pela minha vitória.

Obrigado a todos!

BIOGRAFIA

Valdinei Araújo Gonçalves, filho de Jose Carlos Gonçalves e Maria Aparecida de Araújo Gonçalves, nasceu em 1 de setembro de 1987, no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Em dezembro de 2005, concluiu o Ensino Médio no colégio Estadual Doutor Raimundo Alves Torres, Viçosa - MG. Em janeiro de 2012, graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Em março de 2012, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em março de 2014. No mesmo ano ingressou no Doutorado no programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 26 de fevereiro de 2018.

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract.....	viii
Introdução geral	1
Referências.....	5
Sorção do indaziflam em solos com diferentes níveis de pH estimada pelos métodos da planta indicadora e cromatográfico.....	8
Resumo.....	8
Abstract.....	9
Introdução.....	10
Material e métodos	11
Resultados e discussão	15
Conclusão	22
Referências.....	22
Lixiviação do indaziflam em solos com diferentes valores de pH determinada via planta indicadora e cromatografia.....	27
Resumo	27
Abstract.....	28
Introdução.....	29
Material e métodos	30
Resultados e discussão	33
Conclusão.....	38
Referências	38
Mobilidade do indaziflam em solos com diferentes atributos.....	42
Resumo	42
Abstract.....	43
Introdução.....	44
Material e métodos	45

Resultados e discussão	47
Conclusão.....	52
Referências	52
Considerações finais	56

RESUMO

GONÇALVES, Valdinei Araújo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Dinâmica do indaziflam em solos do Brasil avaliada pelas técnicas da planta indicadora e cromatografia.** Orientador: Lino Roberto Ferreira. Coorientadores: Francisco Claudio Lopes de Freitas e Carlos Sigueyuki Sedyama.

A utilização de herbicidas no manejo das plantas daninhas tem se destacado como uma prática indispensável nos sistemas de produção agrícola. No entanto, para o correto uso dessa tecnologia é fundamental que se entenda o comportamento desses produtos no ambiente, sobretudo no solo, que é o destino final de grande parte dos herbicidas aplicados. O indaziflam é um herbicida recentemente lançado no Brasil e por esse motivo, pouco se conhece sobre a sua dinâmica nas diferentes classes de solos, principalmente quando se trata da sua sorção e lixiviação. Diante disso, avaliou-se no presente estudo os processos de sorção e lixiviação do indaziflam em solos brasileiros com características físicas e químicas distintas, utilizando as técnicas da planta indicadora e da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Foram conduzidos três experimentos, no primeiro e segundo foram avaliados, respectivamente, a sorção e lixiviação do indaziflam em dois solos (Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo), com dois valores de pH, por meio da técnica da planta indicadora e da CLAE, e no terceiro estimou-se a lixiviação desse herbicida em cinco solos brasileiros sendo, três Argissolos Vermelho-Amarelo, um Latossolo Vermelho-Estrófico e um Latossolo Vermelho-Distrófico, provenientes de diferentes regiões do Brasil, utilizando a técnica da planta indicadora. Verificou-se que a sorção e lixiviação do indaziflam nesse solo são afetadas pelas características intrínsecas de cada um, principalmente pelo pH e teor de matéria orgânica, tendo o pH maior destaque. Conclui-se que o uso da planta indicadora e da CLAE pode levar a obtenção de resultados satisfatórios nos estudos da dinâmica do indaziflam nos solos, podendo-se optar pelo uso de cada uma dessas técnicas de forma isolada ou complementar. O pH e a matéria orgânica são características que afetam a sorção e a lixiviação do indaziflam nos solos estudados, sendo maior destaque dado ao pH, que estando em valores mais altos reduz a sorção, potencializando a lixiviação. Recomendações do indaziflam, eficientes do ponto de vista agrônomo e seguras do ponto de vista ambiental, devem ser feitas, principalmente, levando-se em consideração as características dos solos, sendo as mais importantes pH e matéria orgânica.

ABSTRACT

GONÇALVES, Valdinei Araújo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Dynamics of indaziflam in Brazilian soils evaluated by the techniques of the indicator plant and chromatography.** Advisor: Lino Roberto Ferreira. Co-advisors: Francisco Claudio Lopes de Freitas e Carlos Sigueyuki Sedyama.

The use of herbicides in weed management has emerged as an indispensable practice in agricultural production systems. However, for the correct use of this technology it is fundamental to understand the behavior of these products in the environment, especially in the soil, which is the final destination of most of the applied herbicides. Indaziflam is a herbicide recently introduced in Brazil and for this reason, little is known about its dynamics in the different classes of soils, especially when it comes to its sorption and leaching. In the present study, indaziflam sorption and leaching processes were evaluated in Brazilian soils with different physical and chemical characteristics, using the techniques of the indicator plant and high performance liquid chromatography (HPLC). Three experiments were conducted, in the first and second were evaluated, respectively, The indaziflam sorption and leaching were evaluated in two soils (Red-Yellow Latosol and Cambisol), with two pH values, using the indicator plant technique and the HPLC, respectively. In the third one, it was estimated the leaching of this herbicide in five Brazilian soils, being three Red-Yellow Argisols, one Red-Strophic Latosol and one Red-Dystrophic Latosol, from different regions of Brazil, using the indicator plant technique. It was verified that sorption and leaching of indaziflam in this soil are affected by the intrinsic characteristics of each one, mainly by the pH and organic matter content, being the pH the most important. It is concluded that the use of the indicator plant and the HPLC can lead to satisfactory results in the studies of the indaziflam dynamics in soils, and it is possible to opt for the use of each one of these techniques in an isolated or complementary way. The pH and organic matter are characteristics that affect the sorption and leaching indaziflam in the studied soils, being more emphasized given the pH, which being in more higher values reduces the sorption, potentializing the leaching. Recommendations of indaziflam, agronomically efficient and environmentally safe, should be made, mainly, taking into account the soil characteristics, being the most important pH and organic matter.

INTRODUÇÃO GERAL

O controle químico das plantas daninhas é uma prática utilizada pela maioria dos produtores, por se tratar de um método com menor demanda por mão-de-obra, menor custo e maior eficiência de controle (Silva et al., 2013). No entanto, a falta de conhecimento adequado para o uso correto dos herbicidas pode comprometer a eficiência agrônômica e, além disso, potencializar os riscos de contaminação ambiental.

Grande parte dos herbicidas aplicados atinge, de forma direta ou indireta, o solo, onde estão sujeitos aos processos de redistribuição e degradação, os quais são de extrema importância para determinação do potencial contaminante desses compostos e, também, para o sucesso ou fracasso do herbicida no controle das plantas daninhas (Costa, 2015).

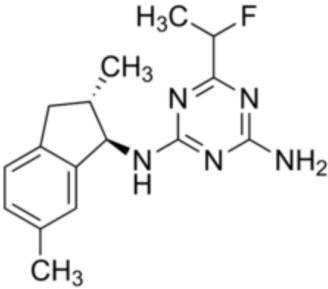
A sorção e a lixiviação destacam-se como importantes processos relacionados com o comportamento dos herbicidas no solo, influenciando diretamente a mobilidade e a degradação desses produtos. O primeiro está relacionado com a atração e retenção das moléculas, ou íons, à superfície das partículas sólidas que formam os solos, principalmente argila e matéria orgânica (Prata & Lavorenti, 2000), podendo ser caracterizado como um dos principais responsáveis pelo controle da disponibilidade do herbicida para a planta-alvo, para os microrganismos do solo, responsáveis, na maioria das vezes, pelo processo de degradação desses produtos. Deve-se destacar também que a sorção é responsável pelo controle do movimento do herbicida no perfil do solo (Herwig et al., 2001).

A lixiviação está relacionada com a movimentação/transporte de moléculas solúveis em água ao longo do perfil do solo (Prata & Lavorenti, 2000) e, segundo Oliveira e Brighent (2011), é o processo responsável pela distribuição do herbicida nos primeiros centímetros do solo, onde irá exercer controle das plantas daninhas. No entanto, se a lixiviação for elevada poderá ocorrer contaminação dos corpos d'água.

A ocorrência, tanto da sorção quanto da lixiviação, é dependente das características físicas e químicas do herbicida (solubilidade, adsorvidade, constante de dissociação ácida (pKa), coeficiente de sorção normalizado para o teor de carbono orgânico do solo (Koc)) e das propriedades e características do solo (teor de argila, teor de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, capacidade de troca aniônica e umidade) (Inoue et al., 2003). Portanto, quando se trata do estudo de herbicidas no solo é importante conhecer as características dos produtos utilizados, bem como dos solos onde esses são aplicados, a fim de minimizar os possíveis efeitos negativos que esses compostos possam causar ao ambiente (Oliveira Jr, 2002; Pereira, 2016).

O indaziflam, (N-[(1R,2S)-2,3-dihidro-2,6-dimetil-1H-inden-1-yl]-6-[(1R)-1-fluoroetil]-1,3,5-triazina-2,4-diamina) (Tabela 1), é um herbicida pertencente à classe química alkylazine, registrado para uso no Brasil (MAPA, 2016). Esse produto possui como mecanismo de ação a inibição da biossíntese de celulose, atuando, principalmente, na formação da parede celular (Guerra et al., 2013). O indaziflam possui atividade tanto em pré-emergência quanto em pós-emergência inicial de plantas daninhas monocotiledôneas e dicotiledôneas, sendo, porém, mais eficiente no controle das monocotiledôneas (Amim et al., 2014).

Tabela 1: Fórmula estrutural e características do indaziflam

Fórmula Estrutural	Características
	<ul style="list-style-type: none"> - Fórmula molecular: C₁₆H₂₀FN₅; - Solubilidade (mg L⁻¹): 4,4 (pH 4,0) ou 2,2 (pH 7,0-9,0) (Bayer, 2010); - pKa: 3,50 (Bayer, 2010); - Kow: 2,80 (Bayer, 2010); - Meia vida média - t_{1/2} (dias): > 150 dias (U.S. EPA, 2010); - PV: 6,92 x 10⁻⁸ (Bayer, 2010).

pKa - constante de equilíbrio de ionização ácido; Kow - coeficiente de partição octanol-água; PV - Pressão de Vapor.

De acordo com Brabham et al. (2014), plantas de *Arabidopsis thaliana*, após serem tratadas com o indaziflam, apresentaram paralização da divisão e do crescimento celular. Segundo esses autores, isso ocorre pelo fato de o indaziflam impedir a polimerização de celulose a partir do substrato UDP-glicose, realizada pela glucosiltransferase e, também, por inibir a multiplicação das células, a partir de outros polissacarídeos, devido ao acúmulo de ácido nítrico nas mesmas. Eles observaram que a presença do indaziflam inibiu a incorporação do C₁₄ da glicose em ácidos insolúveis da fração de celulose, o qual contribui para formação da parede celular. Assim, a partir desses resultados, é possível considerar o indaziflam como herbicida inibidor da formação e multiplicação celular.

O caráter ácido fraco do indaziflam (pKa=3,5) é uma importante característica que faz com este tenha o comportamento fortemente influenciado pelo pH do solo, onde é utilizado. De acordo com El Madani et al. (2003) os herbicidas que apresentam caráter ácido fraco e valor de pKa menor que o valor de pH do meio, apresentam sorção reduzida, em consequência do predomínio das formas dissociadas de caráter aniônico (carga

negativas), as quais são repelidas pelas cargas negativas disponíveis na matriz do solo.

A disponibilidade de sítios que possibilitam a sorção dos herbicidas nos solos pode ser variável sob diferentes condições e características físicas e químicas dos solos, assim, dependendo da condição o produto irá apresentar maior ou menor retenção e/ou mobilidade, afetando, conseqüentemente, sua eficiência agrônômica e potencial de contaminação (Refatti et al., 2015).

Para avaliar a ocorrência dos processos relacionados com a dinâmica dos herbicidas no solo, sorção e lixiviação, podem ser empregadas as técnicas da planta indicadora e da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Na primeira são utilizadas espécies vegetais que apresentam alta sensibilidade ao herbicida de interesse, as quais são denominadas bioindicadoras (Inoue et al., 2007). Na segunda, as análises são realizadas em condições de laboratório, utilizando técnicas de extração do herbicida, com o emprego de reagentes químicos, e aparelho denominado cromatógrafo para realização da detecção e quantificação (Braga et al., 2016).

A técnica da planta indicadora pode ser considerada de fácil execução, uma vez que os resíduos de herbicidas presentes no solo são detectados por meio da alteração das características biológicas da planta-teste, dispensando-se o uso de equipamentos e reagentes de custo elevado (Freitas et al., 2012). Além disso, essa técnica permite a detecção de concentrações muito baixas do herbicida, conseqüência da elevada sensibilidade das plantas indicadoras, por se tratar de um organismo vivo (Braga et al., 2016). Já a análise por CLAE pode ser considerada uma técnica de maior complexidade, haja vista a necessidade de utilização de laboratórios sofisticados e mão-de-obra altamente qualificada para o manuseio do equipamento (Braga et al., 2016). No entanto, deve-se destacar que ao se usar a CLAE pode-se ter a possibilidade de detectar a quantidade do herbicida livre e ativa no solo, o que não é possível quando se usa a planta indicadora.

No estudo da sorção dos herbicidas no solo pelo método da CLAE, é muito comum o uso das isotermas de sorção, por se tratar de um processo que, na maioria das vezes, não ocorrer de forma linear, principalmente devido a capacidade limitada de formar ligações com a matéria orgânica e argila, principais sítios de ligação de herbicidas, e devido às variações do coeficiente de sorção com a temperatura e umidade do solo. As isotermas de sorção descrevem o comportamento do herbicida no solo em diferentes concentrações iniciais, sendo as isotermas classificadas como dos tipos S, H, C e L (Silva et al., 2013).

Isotermas do tipo S se caracterizam por baixa sorção inicial seguida, posteriormente, por aumento na sorção devido à associação entre as moléculas adsorventes. Isotermas do

tipo H descrevem uma altíssima afinidade do herbicida pela superfície adsorvente, mesmo aquele estando em baixas concentrações. Isotermas do tipo C mostram que a sorção aumenta de forma linear com o aumento da concentração do herbicida, devido à criação de novos grupos funcionais ligantes no solo. Isotermas do tipo L, mais comum de ocorrer com herbicidas no solo, mostram decréscimo na sorção quando há elevação da concentração do herbicida na solução do solo (Silva et al., 2013).

Pelo exposto, percebe-se que cada método (planta indicadora e CLAE) usado para descrever o comportamento do herbicida no solo apresenta sua peculiaridade, com vantagens e desvantagens. Assim, pode-se dizer que, desde que haja possibilidade, deve-se usar os dois métodos, pois irá aliar a maior sensibilidade de detecção da planta indicadora à capacidade de quantificação do herbicida livre e ativo no solo, possível pela cromatografia, tendo-se respostas mais claras e melhor entendimento dos eventos ocorridos (Braga et al., 2016).

Por ser o indaziflam um herbicida de uso recente no Brasil, é importante conhecer a sua sorção e lixiviação em solos tropicais, onde predominam minerais 1:1, como a caulinita, com baixa capacidade de expansão e cargas dependentes de pH, utilizando para tanto os métodos da planta indicadora e da cromatografia líquida, uma vez que a maioria dos estudos realizados com esse herbicida foram conduzidos em solos de regiões temperadas, os quais apresentam características contrastantes com os solos tropicais (Alonso et al., 2011; Jhala et al., 2012; Guerra et al., 2016).

O presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de ensaios utilizando planta indicadora e cromatografia, a sorção e lixiviação do indaziflam em solos brasileiros com diferentes características.

REFERÊNCIAS

ALONSO, D. G.; KOSKINEN, W. C.; OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; MISLANKAR, S. Sorption–desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 24, p. 13096-13101, 2011.

AMIM, R. T.; FREITAS, S. P.; FREITAS, I. L. J.; GRAVINA, G. A.; PAES, H. M. F. Controle de plantas daninhas pelo indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 791-800, 2014.

BAYER ENVIRONMENTAL SCIENCE. **Specticle Herbicide Technical Bulletin**; 2010; 16 pp.

BRABHAM, C.; LEI, L.; GU, Y.; STORK, J.; BARRETT, M.; DEBOLT, S. Indaziflam herbicidal action: a potent cellulose biosynthesis inhibitor. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1177-1185, 2014.

BRAGA, D. F.; FREITAS, F. C. L.; ROCHA, P. R. R.; ARAUJO, A. G. D.; MELO, V. C. Leaching of sulfentrazone in soils from the sugarcane region in the northeast region of Brazil. **Planta Daninha**, v. 34, n. 1, p. 161-169, 2016.

COSTA, A. I. G. **Comportamento do herbicida fomesafen em solos com diferentes características físicas e químicas**. 2015. 69f. Tese (Doutorado em Agroquímica) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

EL MADANI, M.; EL AZZOUZI, M.; ZRINEH, A.; MARTENS, D.; KETTRUP, A. pH effect and kinetic studies of the binding behaviour of imazethapyr herbicide on some Moroccan soils. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 12, n. 9, p. 1114-1119, 2003.

FREITAS, F. C. L.; SILVA, A. A.; SILVA, L. O. C. ROCHA, P. R. R., GUIMARÃES, F. C. N., FREITAS, M. A. M.; FELIPE, R. S. Mobilidade do ametryn em solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 641-648, 2012.

GUERRA, N.; de OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; de OLIVEIRA NETO, A. M.; BRAZ, G. B. P. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 285-295, 2013.

GUERRA, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GEMELLI, T. M. D. C. J.; GUERRA, A. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar. **Campo Digital**, v. 11, n. 1, p. 42-53, 2016.

HERWIG, U.; KLUMPP, E.; NARRES, H. D.; MILAN, S. J. Physicochemical interactions between atrazine and clay minerals. **Applied Clay Science**, v. 18, n. 5-6, p. 201-222, 2001.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA Jr, R. S.; REGITANO, J. B.; TORMENA, C. A.; TORNISIELO, V. L.; CONSTANTIN, J. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação dos herbicidas comercializados no Estado do Paraná. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 313-323, 2003.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; ALONSO, D. G. Leaching potential of imazapic and isoxaflutole in soil columns. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007.

JHALA, A. J.; SINGH, M. LEACHING of indaziflam compared with residual herbicides commonly used in Florida citrus. **Weed Technology**, v. 26, n. 3, p. 602-607, 2012.

MAPA – **Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 22/03/2017.

OLIVEIRA Jr., R. S. Conceitos importantes no estudo do comportamento de herbicidas no solo. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 9-13, 2002.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENT, A. M. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. p. 263-304. 2011.

PEREIRA, G. A. M. **Comportamento do clomazone em solos tropicais**. 2016. 75f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. **Revista Biociências**, v. 6, n.2, p.17-22, 2000.

REFATTI, J. P.; de AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; MANICA-BERTO, R.; DA CAS BUNDT, A.; BALBÉ ELGUEIRA, D. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, 2014.

SILVA, A. A.; FERREIRA, A. F.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, J. B. Métodos de controle de plantas daninhas. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. p.189-248.

U.S. EPA. **Pesticide fact sheet**. Conditional registration, 108 pp, 2010.

SORÇÃO DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE pH ESTIMADA PELAS TÉCNICAS DA PLANTA INDICADORA E CROMATOGRAFIA LÍQUIDA

Resumo – Os herbicidas aplicados em pré-emergência têm eficiência agrônômica quando disponíveis na solução do solo, principalmente na camada superficial (0-10 cm), região de maior concentração das sementes das plantas daninhas. O processo que controla essa disponibilidade é denominado sorção, o qual é dependente de forças de atração e retenção entre as moléculas do herbicida e os colóides do solo. Neste trabalho foi avaliada a sorção do indaziflam, utilizando a técnica da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) e da planta indicadora, em dois solos brasileiros com dois níveis de pH. Os solos utilizados foram o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Cambissolo, ambos com dois valores de pH (5,1 e 6,1). O ensaio com a planta indicadora foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, sendo empregado o *Sorghum bicolor* como indicador da presença do indaziflam. As avaliações referentes à porcentagem de intoxicação e acúmulo de matéria seca total das plantas foram realizadas aos 21 dias após aplicação do herbicida e semeio do *S. bicolor*. Com os resultados estimou-se o C_{50} , que corresponde à dose do herbicida que inibe 50% do acúmulo de matéria seca total da planta indicadora. Na CLAE foram utilizadas diferentes concentrações do indaziflam (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; e 3,0 mg L⁻¹), preparadas em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, as quais foram adicionadas aos solos para determinação da sorção e dessorção do herbicida, utilizando o método “*batch equilibrium*”. Verificou-se que a elevação do valor de pH dos dois solos de 5,1 para 6,1, proporcionou diminuição da C_{50} e dos valores do coeficiente de sorção. A dessorção, parâmetro estimado apenas pela CLAE, apresentou comportamento inverso ao da sorção, ou seja, na condição de maior sorção foi observada a menor dessorção, indicando que nessa situação o herbicida tem maior dificuldade de retornar à solução do solo. Conclui-se que, a elevação do pH dos solos estudados aumenta a sorção do indaziflam, influenciando as recomendações desse herbicida, tanto do ponto de vista agrônômico quanto ambiental. Quando se pretende verificar a presença ou ausência do indaziflam no solo a técnica da planta indicadora possui eficiência satisfatória. Todavia, para a quantificação da concentração desse herbicida livre e ativa no solo faz-se necessário à realização do ensaio cromatográfico.

Palavras-chave: herbicida no solo, impacto ambiental, bioensaio.

SORPTION OF INDAZIFLAM IN SOILS WITH DIFFERENT LEVELS OF pH ESTIMATED BY INDICATOR PLANT TECHNIQUES AND LIQUID CHROMATOGRAPHY

Abstract – Pre-emergence herbicides have agronomic efficiency when available in the soil solution, mainly in the superficial layer (0-10 cm), the region with the highest concentration of weed seeds. The process controlling this availability is called sorption, which is dependent on the attraction and retention forces between the herbicide molecules and the soil colloids. In this work, the indaziflam sorption was evaluated using high efficiency liquid chromatography (HPLC) and the indicator plant in two Brazilian soils with two pH levels. The soils used were the Red-Yellow Latosol and the Cambisol, both with two pH values (5.1 and 6.1). The assay with the indicator plant was conducted in the completely randomized design, *Sorghum bicolor* being used as indicator of the presence of indaziflam. The evaluations regarding the percentage of intoxication and accumulation of total dry matter of the plants were performed at 21 days after application of the herbicide and sowing of *S. bicolor*. With the results the C_{50} was estimated, which corresponds to the dose of the herbicide that inhibits 50% of the accumulation of total dry matter of the indicator plant. Different concentrations of indaziflam (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 mg L⁻¹) were used, prepared in 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂, which were added to the soils to determine sorption and desorption of the herbicide, using the batch equilibrium method. It was found that raising the pH of the two soils from 5.1 to 6.1 resulted in a decrease in C_{50} and sorption coefficient values. The desorption, a parameter estimated only by HPLC, showed an inverse behavior to that of the sorption, that is, in the condition of higher sorption, the lowest desorption was observed, indicating that in this situation the herbicide has greater difficulty in returning to the soil solution. It is concluded that the pH increase of the studied soils increases indaziflam sorption, influencing the recommendations of this herbicide, both from the agronomic and environmental point of view. When it is desired to verify the presence or absence of indaziflam in the Red-Yellow Latosol and the Cambisol, the indicator plant technique has satisfactory efficiency. However, for the quantification of the concentration of this herbicide free and active in the soil it is necessary to carry out the liquid chromatography test.

Key words: herbicide in soil, environmental impact, bioassay.

INTRODUÇÃO

A interferência das plantas daninhas nos cultivos agrícolas têm sido um dos principais pontos críticos do processo produtivo, dessa forma manejar corretamente essas plantas tem se tornado prática indispensável. O controle químico, por meio do uso de herbicidas, tem sido a estratégia mais empregada para o controle das plantas daninhas em razão da menor dependência de mão-de-obra e maior eficiência no controle com seletividade para as culturas mesmo em épocas chuvosas (Silva et al., 2013).

Quando os herbicidas são aplicados em pré-emergência, é indispensável que estes permaneçam por determinado período de tempo disponível na solução do solo e o processo que controla essa disponibilidade é denominado sorção. A sorção se caracteriza pela atração e ligação de uma ou mais camadas iônicas ou moleculares do herbicida para superfície do solo, desse modo trata-se de um processo influenciado por características do herbicida (solubilidade, adsorvidade, constante de dissociação ácida (pKa), coeficiente de sorção normalizado para o teor de carbono orgânico do solo (Koc), Coeficiente de partição octanol-água (Kow)) bem como pelas características do solo (teor de argila, teor de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, capacidade de troca aniônica e umidade) (Castro Neto, 2014; Freitas et al., 2014).

O Indaziflam, (N-[(1R,2S)-2,3-dihydro-2,6-dimethyl-1H-inden-1-yl]-6-[(1R)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine), encontra-se com registro no Brasil para uso em pré-emergência das plantas daninhas nas culturas de café, cana-de-açúcar, eucalipto, pinus, além de algumas frutíferas perenes como: Banana, caju, citros, coco, dendê, goiaba, maçã, manga e uva (MAPA, 2018). Pertencente à classe química alkylazine apresenta como mecanismo de ação a inibição da biossíntese de parede celular (Guerra et al., 2013; Brabham et al., 2014). Há relatos de que a inibição provavelmente ocorra em algum ponto da etapa de reticulação das microfibrilas de celulose (Kaapro & Hall, 2012; Guerra et al., 2014). Como principais características do produto destacam-se: efeito residual prolongado para o controle de plantas daninhas (Brosnan et al., 2012) com persistência maior que 150 dias (U.S. EPA, 2010), baixa solubilidade em água ($0,0028 \text{ kg m}^{-3}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) e $\text{pKa}=3,5$ (Bayer, 2010).

Informações acerca da sorção desse herbicida em solos brasileiros, onde predominam minerais 1:1, como a caulinita, com baixa capacidade de expansão e cargas dependentes de pH, são ainda escassas. A maioria dos estudos disponíveis na literatura foram conduzidos em solos de regiões temperadas, que de maneira geral apresentam características bem específicas como minerais de argila expansíveis (2:1) com maior área superficial

específica, como a montmorilonita e vemiculita (Alonso et al., 2011; Jhala et al., 2012; Alonso et al., 2015).

O estudo da sorção de herbicidas no solo pode ser realizado utilizando-se a técnica da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), a qual possui grande precisão para análises qualitativas e quantitativas. Também pode ser por meio do uso da técnica da planta indicadora, que, segundo Inoue et al. (2007), consiste no uso de espécies vegetais com alta sensibilidade ao herbicida de interesse, as quais são denominadas bioindicadoras.

Nas análises por cromatografia são utilizados laboratórios sofisticados e grandes quantidades de solventes e outros reagentes químicos, o que pode dificultar o uso da técnica. No entanto, como vantagem tem-se a determinação da quantidade do herbicida livre e ativa no solo (Silva et al., 2012). Já a detecção utilizando a planta indicadora destaca-se como um processo mais simples e barato, uma vez que não são utilizados estruturas e equipamentos de alto valor agregado, facilitando a execução dos trabalhos (Melo et al., 2010 e Freitas et al., 2012). Determinar qual método é mais preciso, na maioria das vezes, não é tarefa simples, pois é necessário conhecer os resultados obtidos em cada um e entender como esse descreve a dinâmica dos herbicidas no solo.

Assim, considerando a carência de pesquisas relacionadas com a sorção do indaziflam em solos do Brasil e visando esclarecer a eficiência dos métodos da planta indicadora e da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) no desenvolvimento desse tipo estudo, conduziu-se o presente trabalho utilizando dois solos brasileiros, ambos com dois níveis de pH.

MATERIAL E MÉTODOS

Para realização dos ensaios foram coletadas amostras, na profundidade de 0 a 20 cm, de dois solos com características distintas, Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), da região de Viçosa-MG, e Cambissolo (RQ), da região de Santa Vitória-MG.

As amostras foram peneiradas em malha de 4 mm e, posteriormente, divididas em duas subamostras, uma mantida com o pH natural (5,1) e a outra teve o pH corrigido para 6,1, por meio de curva de neutralização de acidez, utilizando calcário dolomítico PRNT de 80% e um tempo de incubação de 30 dias. Em seguida as amostras foram caracterizadas física e quimicamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização física e química das amostras de solo utilizadas no experimento

Análise física													
Solo	Areia			Silte			Argila			Classe textural			
	(Dag Kg ⁻¹)												
LVA – Viçosa, MG	43,0			7,0			50,0			Argilo-arenosa			
RQ – Santa Vitória, MG	81,0			4,0			15,0			Areia-franca			
Análise química													
Solo	pH	P	K	Ca	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	MO
	(H ₂ O)	(mg dm ⁻³)		(Cmolc dm ⁻³)							(%)		(dag kg ⁻¹)
LVA – Viçosa, MG Sem calagem	5,1	2,2	33	3,4	0,1	0,00	5,45	3,58	3,58	9,03	40	0	3,47
LVA – Viçosa, MG Com calagem	6,1	2,9	41	4,7	0,1	0,00	3,30	4,90	4,90	8,20	60	0	3,47
RQ – Santa Vitória, MG Sem calagem	5,1	69,6	23	1,0	0,6	0,2	2,97	1,66	1,86	4,63	36	11	1,86
RQ – Santa Vitória, MG Com calagem	6,1	71,9	27	2,7	1,0	0,0	1,30	3,70	3,70	5,20	56	12	1,86

Análises realizadas no Laboratório de Análises de Solo Viçosa Ltda. pH: água, KCl e CaCl₂- relação 1:2,5. P-K: Extrator Mehlich 1. Ca-Mg e Al: Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹. H + Al – Acidez potencial – Extrator: acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; SB - Soma de bases trocáveis; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; T – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – Índice de saturação de bases; m - Índice de saturação de alumínio; MO – Matéria orgânica

Determinação da sorção pelo método do ensaio biológico

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no campus da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizados cinco substratos, sendo dois solos com dois valores de pH (5,1 e 6,1) e um substrato inerte (areia lavada), o qual foi utilizado na elaboração da curva de dose resposta do indaziflam. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições.

O substrato inerte foi obtido a partir da incubação da areia com solução de HCl por 24 horas, seguida de lavagem em água corrente e nova incubação por mais 24 horas com solução de NaOH, sendo aplicada nova lavagem com água corrente em abundância até se atingir pH 7,0, conforme metodologia utilizada por Freitas et al. (2014).

Os substratos foram colocados em vasos com fundos vedados, com capacidade de 300 cm³. Em seguida, procedeu-se a aplicação do herbicida nas diferentes doses, as quais foram definidas em ensaios preliminares, para cada substrato, solo (0; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 100; 200 g de indaziflam ha⁻¹) e substrato inerte (0; 0,06; 0,12; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00; 3,00; 5,00; 10,00 g de indaziflam ha⁻¹). Para aplicação do herbicida foi utilizado um pulverizador costal pressurizado a CO₂, equipado com duas pontas TTI 110.02, espaçadas de 0,5 m, mantidas à pressão de 300 kPa, aplicando-se volume correspondente a 150 L ha⁻¹ de calda. Durante a aplicação a temperatura era de 23,6°C, a umidade relativa do ar 69% e a velocidade do vento 1,8 km h⁻¹.

Após aplicação do indaziflam, o conteúdo de cada vaso foi vertido em sacos plásticos para homogeneização do herbicida em todo volume de substrato. Em seguida, foram semeadas três sementes, por vaso, de *S. bicolor*, cultivar BRS 506, espécie utilizada como planta indicadora da presença do indaziflam (Braga, 2017) e os vasos mantidos em casa de vegetação por 21 dias, com irrigação e adubação com solução de complementação nutricional a base de NPK+m micronutrientes.

Aos 21 dias após a semeadura, foi avaliada a porcentagem de intoxicação das plantas de sorgo, atribuindo-se notas de 0 (emergência e desenvolvimento normal da planta) a 100 (Ausência de germinação ou morte da planta) de acordo com escala da ALAM (1974). Posteriormente, as plantas foram cortadas rente à superfície dos substratos e o sistema radicular lavado em água corrente. Todo material colhido foi seco em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) até atingir massa constante. Os valores de acúmulo de matéria seca total (MS) das plantas foram transformados para porcentagem em relação a MS da testemunha (dose zero).

Os resultados foram interpretados utilizando regressão não-linear, adotando-se o modelo exponencial que melhor se ajustou ao comportamento das variáveis analisadas, e então determinou-se a C_{50} (dose do indaziflam capaz de causar 50% de intoxicação e 50% de redução no acúmulo de matéria seca total da planta indicadora) nos solos e no substrato inerte. De posse dos valores de C_{50} obtidos para cada substrato e utilizando equação 1 determinou-se a relação de sorção (RS) do indaziflam nos solos.

Equação 1: Determinação da relação de sorção do herbicida (Souza, 1994)

$$RS = \frac{C_{50Solo} - C_{50Areia}}{C_{50Areia}}$$

Determinação da sorção pelo método da cromatografia líquida de alta eficiência

O ensaio foi realizado em triplicata, no Laboratório de Herbicida no Solo da Universidade Federal de Viçosa, utilizando aparelhamento de cromatografia líquida de alta eficiência, modelo Shimadzu LC 20AT Japão, com detector UV/vis (Schimadzu SPD-20A) e coluna de aço inoxidável C18 (VP, ShimadzuShim-pack ODS 150 x 6 mm x 4 mm id.). Usou-se como fase móvel acetonitrila e água (acidificada com 0,01% de ácido acético) na proporção de 60:40 (V:V), com volume de injeção de 20 µL, a um fluxo de 1,0 mL min⁻¹ e comprimento de onda de 212 nm, a uma temperatura de 30 °C (Romero et al., 2018), condições que resultaram em um tempo de retenção do indaziflam igual a 4,6 minutos.

Para determinação do tempo de equilíbrio da sorção do indaziflam em cada substrato, utilizou-se o método “*batch equilibrium*”, que possui elevada eficiência para descrever a

sorção de herbicidas no solo (Alonso, et al., 2011; Rocha et al., 2013). Nessa determinação seguiu-se metodologia proposta por Romero et al. (2018), onde se diz que 2,000 gramas de solo é colocado em tubos de polipropileno tipo Falcon, e a esse solo adiciona-se 10 mL de solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, contendo $1,00 \text{ mg L}^{-1}$ do padrão analítico do herbicida indaziflam. Então, a mistura solo+solução é submetida à agitação vertical por diferentes tempos (2; 4; 8; 12; 24 e 32 horas) à temperatura de $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Em seguida, os tubos são centrifugadas a 3000 rpm, durante sete minutos, e a solução sobrenadante é retirada e filtrada em filtro Milipore com membrana politetrafluoretileno (PTFE) de $0,45 \text{ }\mu\text{m}$, para obtenção de a 1,50 mL de solução livre de impurezas, a qual é utilizada para leitura no cromatógrafo.

Na determinação da sorção do indaziflam, 10 mL de solução de trabalho, preparada nas concentrações de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ do herbicida em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, foram adicionadas em tubos Falcon contendo 2,000 g de solo, os quais foram submetidos à agitação vertical por 12 horas (tempo determinado como tempo de equilíbrio). Em seguida, os tubos foram centrifugados a 3000 rpm, por sete minutos e 1,5 mL do sobrenadante filtrado em filtro Milipore com membrana PTFE de $0,45 \text{ }\mu\text{m}$, para análise por CLAE. A quantidade do indaziflam sorvido ao solo (C_s) em mg kg^{-1} foi obtida a partir da diferença entre a quantidade adicionada inicialmente (C_p) e a encontrada na solução de equilíbrio (C_e). Com os valores de C_s e C_e , ajustou-se a equação de Freundlich ($C_s = K_f C_e^{1/n}$), para obtenção dos coeficientes de sorção (K_f) e do fator de linearização ($1/n$), em que C_s = quantidade de herbicida adsorvida em mg g^{-1} de solo; C_{aq} = concentração de herbicida na solução de equilíbrio em mg L^{-1} , K_f é o coeficiente de adsorção de Freundlich em L mg^{-1} e $1/n$ = fator de linearização que determina a intensidade de sorção (Alonso et al., 2011).

O ensaio de dessorção do indaziflam foi realizado adicionalmente no método da CLAE, nesse 10 mL de solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, isenta de herbicida, foi adicionada aos tubos que continham solo após realização do teste de sorção. Esses tubos foram submetidos à nova agitação, nas mesmas condições utilizadas para o ensaio de sorção. Em seguida foram centrifugados por sete minutos a 3.000 rpm, para obtenção do sobrenadante, o qual foi retirado e filtrado em filtro Milipore com membrana PTFE de $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ para obtenção de 1,5 mL de filtrado utilizado na análise por CLAE.

O cálculo da quantidade de indaziflam dessorvido levou em consideração a concentração do herbicida no solo antes da etapa de dessorção e a concentração na solução analisada após extração.

A quantificação foi realizada por meio da comparação das áreas obtidas nos cromatogramas após realização dos ensaios e a identificação, pelo tempo de retenção, foi feita mediante comparação com o padrão analítico do indaziflam. Os dados obtidos foram submetidos à análise de regressão, levando-se em consideração o ajuste dos valores observados para variável dependente (Y) em função da variação dos níveis da variável independente (X).

RESULTADOS E DISCUSÃO

ENSAIO UTILIZANDO PLANTA INDICADORA

Estão apresentadas nas Figuras 1A e 1B, as curvas de dose resposta para porcentagem de intoxicação e acúmulo de matéria seca total de *S. bicolor* cultivado no substrato inerte, aos 21 dias após a aplicação de doses do indaziflam. Essas curvas foram utilizadas para o cálculo dos valores da dose C_{50} , 0,39 g ha⁻¹ para intoxicação e 0,23 g ha⁻¹ para acúmulo de matéria seca total das plantas.

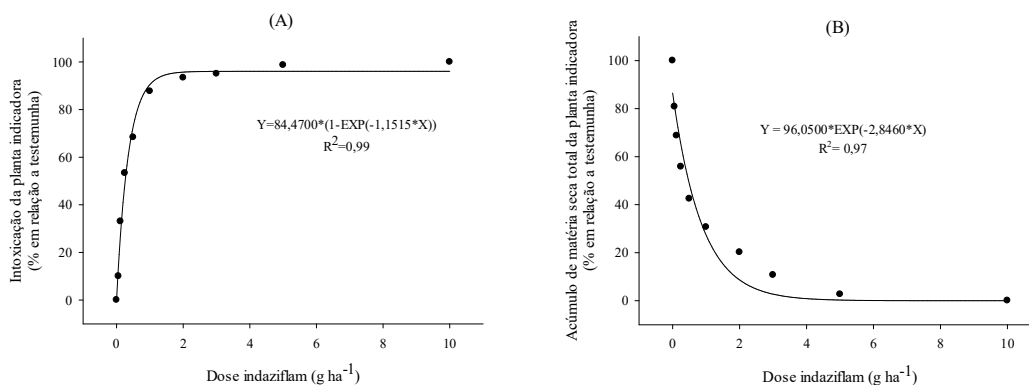


Figura 1: Curva de dose-resposta do herbicida indaziflam, para porcentagem de intoxicação (A) e acúmulo de matéria seca total (B) das plantas de *S. bicolor*, cultivadas em substrato inerte em avaliação realizada aos 21 dias após a aplicação do indaziflam.

Por se tratar de um substrato inerte, considera-se que todo herbicida aplicado esteja disponível na solução, pois suas características físicas e químicas específicas como ausência de matéria orgânica e argila e ausência de cargas de superfície inviabilizam o processo de sorção dos produtos, fazendo com que esses fiquem disponíveis para absorção pelas raízes das plantas reduzindo as doses aplicadas nesse substrato (Inoue et al., 2003; Castro Neto, 2014; Freitas et al., 2014).

Para os solos (LVA e RQ), observou-se que a elevação do pH de 5,1 para 6,1 proporcionou incrementos na porcentagem de intoxicação (Figuras 2A e 2B) e redução no acúmulo de matéria seca total (Figuras 2C e 2D) das plantas de *S. bicolor*, após aplicação

do indaziflam, principalmente nas doses compreendidas entre 4 e 64 g ha⁻¹. Esse resultado evidencia que, para esses solos, a elevação do pH altera o comportamento sortivo do indaziflam, tornando-o mais disponível na solução, sujeito a ser absorvido pelas plantas e carregado para maiores profundidades.

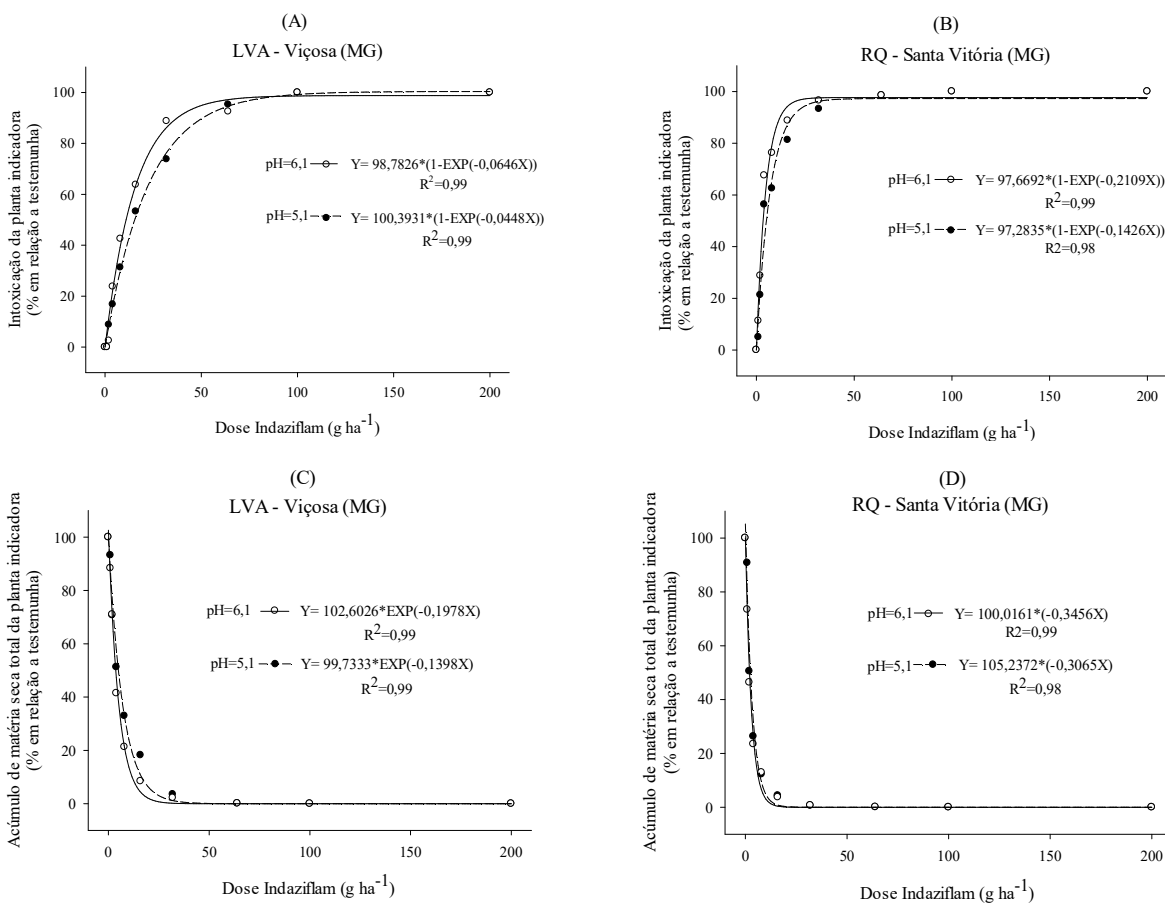


Figura 2: Porcentagem de intoxicação das plantas de *Sorghum bicolor* cultivadas no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (A) e no cambissolo (RQ) (B) e acúmulo de matéria seca total das plantas nesses mesmos solos (LVA (C) e RQ (D)), com dois valores de pH (5,1 e 6,1), em avaliações realizadas aos 21 dias após a aplicação do indaziflam.

Em estudo conduzido por Castro Neto (2014) utilizando os herbicidas imazethapyr e imazapic que, assim como o indaziflam, possuem baixo valor de pKa, constatou-se que o valor de pH da solução do solo é o principal responsável por determinar a forma como o herbicida se apresentará (molecular ou dissociada). Desse modo, para esses herbicidas, quando o valor de pH da solução do solo encontrar-se próximo da neutralidade e/ou superior ao valor de pKa do herbicida, haverá predominância da forma dissociada (forma iônica) do produto, a qual será repelida pelas cargas negativas presentes em abundância na

superfície dos solos, reduzindo a sorção (Refatti et al., 2014), fazendo com que o produto esteja mais disponível na solução do solo.

Cáceres et al. (2010) avaliando a sorção do metsulfuron-metil, herbicida com características semelhantes ao do indaziflam, ou seja, classificado no grupo químico dos ácidos fraco e com baixo valor de pKa (3,3), observaram que com a elevação do pH da solução do solo até 6,1 tem-se redução significativa da sorção, confirmando a influência dessa característica do solo no comportamento sortivo do herbicida.

Os valores de C_{50} para as variáveis porcentagem de intoxicação e acúmulo de matéria seca no *S. bicolor*, tanto no LVA quanto no RQ, foram superiores ao do substrato inerte (Tabela 3). Entretanto, quando se analisa os valores de C_{50} e a razão de sorção dos dois solos, não considerando o substrato inerte, é possível observar que os valores obtidos para o LVA são maiores que para o RQ, podendo-se dizer, nesse caso, que a diferença se deve as características distintas que os solos apresentam, especialmente, maior teor de matéria orgânica e argila (Tabela 1).

Tabela 3: Dose do indaziflam que causa 50% de intoxicação e redução de 50% no acúmulo de matéria seca total das plantas de *S. bicolor* (C_{50}) e razão de sorção (RS) do herbicida, em avaliações realizadas aos 21 dias após aplicação

Substrato	Intoxicação		Matéria seca total	
	C_{50} (g ha ⁻¹)	RS	C_{50} (g ha ⁻¹)	RS
Substrato inerte	0,39	-	0,23	-
LVA – pH=5,1	15,39	38,46	4,93	20,43
LVA – pH=6,1	10,92	27,00	3,82	15,61
RQ – pH=5,1	5,04	11,92	2,42	9,52
RQ – pH=6,1	3,40	7,71	2,01	7,74

As características físicas e químicas específicas de cada solo permitem capacidades diferentes de sorção dos herbicidas, principalmente a mineralogia e o teor de matéria orgânica, os quais são atributos que estão diretamente envolvidos no processo de sorção desses produtos, por possuírem sítios tridimensionais que formam ligações de hidrogênio com os herbicidas, as quais são responsáveis pela sorção de herbicidas iônicos e não iônicos (Inoue et al., 2014).

Segundo Costa (2015), a permanência prolongada do herbicida na solução do solo influenciada pela menor sorção, poderá ter consequências diretas sobre a mobilidade, degradação, persistência e risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas,

além de danos irreversíveis a macro e microfauna dos solos, podendo também afetar diretamente a eficiência agrônômica no controle de plantas daninhas.

ENSAIO UTILIZANDO CROMATOGRAFIA LÍQUIDA DE ALTA EFICIÊNCIA

As curvas de cinética de sorção apresentaram comportamentos distintos em função de cada solo, sendo os maiores índices observados para ambos os solos no valor de pH=5,1 (Figura 3). No entanto, para maior segurança do tempo de equilíbrio e maior facilidade no momento de realização do ensaio, optou-se por trabalhar com o tempo de 12 horas igual para todos os solos. Observou-se, durante a fase inicial de determinação do tempo de equilíbrio, uma rápida sorção seguida, posteriormente, por uma fase lenta. Isso se deve ao grande número de sítios de sorção disponíveis no solo durante a fase inicial, os quais, com o passar do tempo, são ocupados, reduzindo a taxa de sorção (Liu et al., 2010; Rocha et al., 2013).

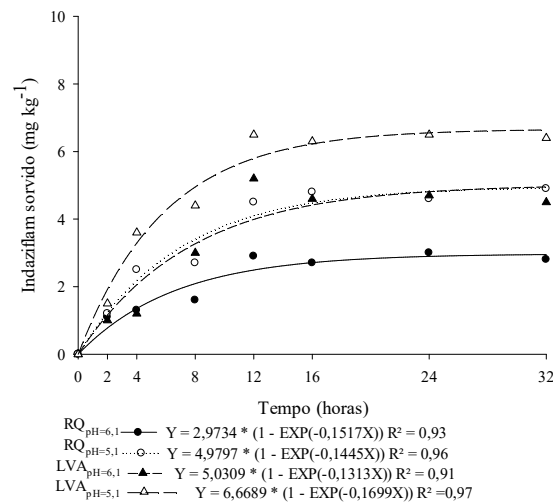


Figura 3 - Estimativas das curvas de cinética de sorção para o indaziflam em dois solos: Cambissolo (RQ) e Latossolo (LVA), cada um com dois valores de pH (5,1 e 6,1), avaliadas em função do tempo.

As isotermas de Freundlich representaram perfeitamente a sorção desse herbicida tanto no LVA quanto no RQ, perceptível pelos valores de coeficientes de determinação (R²), todos iguais a 0,99 (Figura 4).

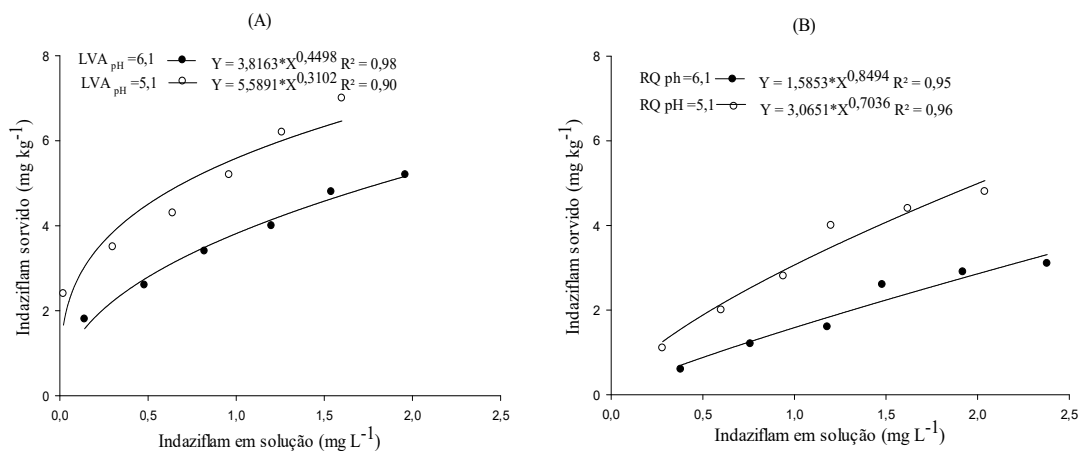


Figura 4 - Sorção do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (A) e Cambissolo (RQ) (B) com diferentes valores de pH.

O parâmetro $1/n$, fator que determina a linearização e a intensidade da sorção do herbicida (Silva et al., 2013), variou de 0,3102 a 0,8494 (Figura 4). Nesse caso pode-se caracterizar o ajuste de isothermas do tipo L, pelo fato de os valores serem inferiores a 1,0. Isothermas do tipo L apresentam inclinação não linear e côncava em relação à abscissa, sugerindo que a disponibilidade de sítios para sorção do indaziflam diminui em consequência da saturação dos sítios de sorção existentes no solo (Falone & Vieira, 2004 e Braga, 2015).

A análise do parâmetro $1/n$ da equação de Freundlich permitiu estimar a interação dos íons em solução com o solvente, neste caso, quando $n > 1$, a curva do modelo apresentará forma côncava indicando condição favorável à sorção; quando $n = 1$ será observada a forma linear, neste caso os sítios energéticos serão equivalentes, mantendo-se a condição de equilíbrio e, quando $n < 1$ a isoterma apresentará forma convexa em relação ao eixo das abscissas caracterizando condição desfavorável à sorção (Haro et al., 2014). No caso do presente estudo, observou-se condição desfavorável a sorção, principalmente para as condições em que os solos apresentam menor valor de pH, uma vez que há rápida saturação dos sítios disponíveis nos solos.

Os valores de K_f variaram de 3,0651 a 5,5891 (Figura 4 e Tabela 4), sendo menor para o RQ pH=6,1 e maior para o LVA pH=5,1, os quais, de acordo a classificação do IBAMA (1990), são baixos. Esse fato permite caracterizar o indaziflam como um herbicida de baixa sorção nos dois solos estudados e, portanto, disponível para absorção pelas plantas.

Entender a força com que os herbicidas se encontram sorvidos nos solos é de extrema importância, pois irá determinar quanto do herbicida ficará retido no solo e quanto

estará disponível na solução com possibilidade de ser absorvido pelas plantas, sofrer degradação microbiana, fotólise, lixiviação e transporte para camadas mais profundas (Run In) ou por escoamento superficial (Run Off) (Kraemer et al., 2009; Braga, 2015).

Tabela 4- Parâmetros da equação de Freundlich da sorção e dessorção do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (RQ) com diferentes valores de pH

Coeficientes sorção	LVA		RQ	
	pH 5,1	pH 6,1	pH 5,1	pH 6,1
Kf	5,5891	3,8163	3,0651	1,5853
1/n	0,3102	0,4498	0,7036	0,8494
R ²	0,90	0,98	0,96	0,96
Coeficientes dessorção				
Kf	7,9106	5,1245	6,2699	4,4534
1/n	0,8408	0,8732	1,5448	2,4561
R ²	0,99	0,98	0,89	0,79
H	0,3689	0,5151	0,4554	0,3458

Kf – Coeficiente de sorção de Freudlich; 1/n – Fator de linearização e R² coeficiente de determinação da equação; índice de histerese (H).

A dessorção do indaziflam foi inversamente correlacionada com o coeficiente de sorção (Kf), visto que nas condições de maiores Kf são observados os menores valores de dessorção (Figura 5). Isso significa que na condição de menor valor de pH do solo o indaziflam apresentará menor capacidade de dessorção, o que de acordo com Vivian et al., (2007) e Rocha et al. (2013) é resultado da existência de ligações fortes entre o herbicida e o solo dificultando o processo de dessorção.

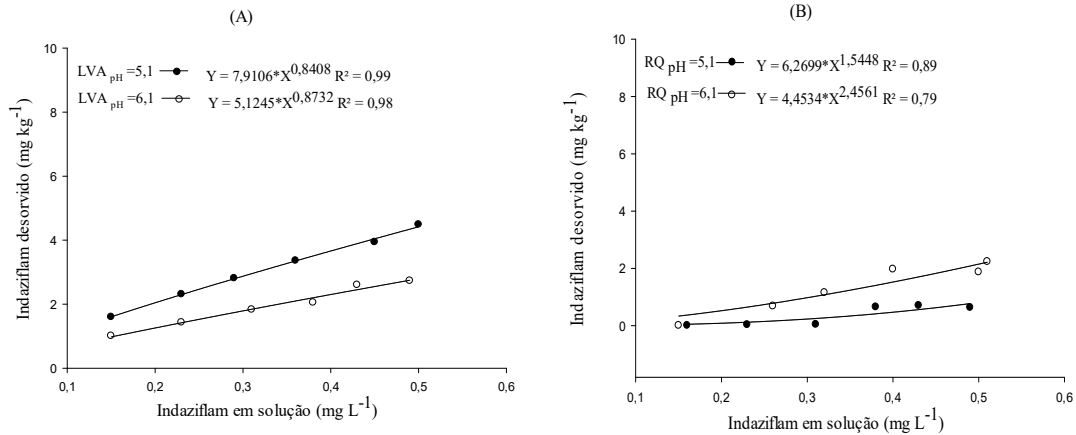


Figura 5 -Dessorção do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (A) e Cambissolo (RQ) (B), com diferentes valores de pH.

A importância da dessorção está relacionada com a taxa de liberação e o potencial de mobilidade dos herbicidas no solo, indicando o grau de reversibilidade do processo sorvido, que pode ser total, quando todo herbicida sorvido retorna à solução do solo, ou parcial, quando apenas parte do herbicida sorvido retorna à solução do solo (Rocha et al., 2013; Faria, 2016).

A permanência do herbicida sorvido origina o fenômeno denominado histerese (H), que se caracteriza pela sorção quase irreversível do herbicida para a solução do solo (Rocha et al., 2013). Observa-se que para os solos estudados a elevação do valor de pH reduz os valores dos índices de histerese (Tabela 4). Isto significa que, nestes solos, a quantidade de herbicida que tende a retornar à solução do solo aumenta com elevação do pH, ou seja, mais facilmente este herbicida estará novamente disponível para às plantas.

O fato de haver maior dessorção do indaziflam após a elevação do pH pode ter maior risco para as culturas em sucessão, uma vez que a prática da calagem, operação realizada com frequência antes da implantação da cultura, irá contribuir para a liberação do herbicida que estava sorvido, tornando-o disponível na solução do solo, podendo causar danos em culturas sensíveis, fenômeno denominado *carryover* (Liu et al., 2010 e Braga, 2015).

Em ambos os métodos de determinação da sorção (planta indicadora e cromatográfico), verificou-se que a elevação do pH da solução dos solos estudados ocasionou redução na sorção do indaziflam. Isso confirma que o método da planta indicadora, pode ser usado com sucesso, quando se trata do estudo da sorção do indaziflam, mesmo se tratando de um método de grande simplicidade. Porém, é importante ressaltar que, para obtenção de resultados mais claros e objetivos deve-se utilizar ambos os

métodos, pois será aliada a sensibilidade de detenção do ensaio biológico a capacidade de quantificação da cromatografia (Braga, 2015).

CONCLUSÃO

Nos dois solos a sorção do indaziflam diminui com a elevação do pH dos solos, enquanto que a dessorção aumenta.

As recomendações seguras do indaziflam, tanto do ponto de vista agrônômica quanto ambiental, para uso no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Cambissolo, serão influenciadas principalmente pelo valor de pH.

A técnica da planta indicadora e da cromatografia líquida de alta eficiência são eficientes para determinação da sorção do indaziflam nos solos estudados.

REFERÊNCIAS

ALONSO, D. G.; KOSKINEN, W. C.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; MISLANKAR, S. Sorption - desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 24, p. 13096-1310, 2011.

ALONSO, D. G.; OLIVEIRA JR, R. S.; HALL, K. E.; KOSKINEN, W. C.; CONSTANTIN, J.; MISLANKAR, S. Changes in sorption of indaziflam and three transformation products in soil with aging. **Geoderma**, p. 239–240, 2015.

BAYER ENVIRONMENTAL SCIENCE. **Specticle herbicide technical bulletin**; 2010; 16 pp.

BRABHAM, C.; LEI, L.; GU, Y.; STORK, J.; BARRETT, M.; DEBOLT, S. Indaziflam herbicidal action: a potent cellulose biosynthesis inhibitor. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1177-1185, 2014.

BRAGA, D. F. **Sorção, dessorção e lixiviação do sulfentrazone em solos da região canavieira do nordeste Brasileiro**. 2015. 91f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

BRAGA, R. R. **SORÇÃO DE INDAZIFLAM E ISOXAFLUTOLE EM SOLOS TROPICAIS**. 2017. 54f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2017.

BROSNAN, J. T.; BREEDEN, G. K.; McCULLOUGH, P. E.; HENRY, G. M. Pre and Post control of annual bluegrass (*Poa annua*) with indaziflam. **Weed Technology**, v. 26, n. 1, p. 48-53, 2012.

CÁCERES, L.; FUENTES, R.; ESCUDEY, M.; FUENTES, E.; BÁEZ, M. Metsulfuron-methyl sorption/desorption behavior on volcanic ash-derived soils. Effect of phosphate and pH. *J. Agric. Food Chemistry*, v. 58, p. 6864–6869, 2010.

CASTRO NETO, M. D. **Sorção, lixiviação e persistência de imidazolinonas em solos utilizados no sistema clearfield de cultivo de arroz**. 2014. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

COSTA, A. I. G. **Comportamento do herbicida fomesafen em solos com diferentes características físicas e químicas**. 2015. 69f. Tese (Doutorado em Agroquímica). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

DE MALEZAS, Asociación Latinoamericana. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. **ALAM**, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.

FALONE, S. Z.; VIEIRA, E. M. Adsorção/dessorção do explosivo tetril em turfa e em Argissolo Vermelho-Amarelo. **Química Nova**, v. 27, n. 6, p.849-854, 2004.

FARIA, A. T. **Sorção, dessorção, meia-vida e lixiviação do tebuthiuron em latossolos brasileiros**. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

FREITAS, F. C. L.; SILVA, A. A.; SILVA, L. O. C.; ROCHA, P. R. R.; GUIMARÃES, F. C. N.; FREITAS, M. A. M.; FELIPE, R. S. Mobilidade do ametryn em solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 641-648, 2012.

FREITAS, M. A. M.; PASSOS, A. B. R. J.; TORRES, L. G.; MORAES, H. M. F.; FAUSTINO, L. A.; ROCHA, P. R. R.; SILVA, A. A. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta Daninha**, v. 32, n. 2, p. 385-392, 2014.

GUERRA, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA NETO, A. M.; BRAZ, G. B. P. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.12, n.3, p.285-295, 2013.

GUERRA, N.; OLIVEIRA NETO, A. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; TAKANO, H. K. Sensibility of plant species to herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 609-617, 2014.

HARO, N. K.; ZANELLA, O.; DEMBOGURSKI, L.; FÉRIS, L. A. **Remoção de bisfenol-a por adsorção –estudo das isothermas de equilíbrio**. X encontro brasileiro sobre adsorção, 2014.

IBAMA. **Manual de testes para avaliação da ecotoxicidade de agentes químicos: E-2. Teste para avaliação da mobilidade**, Brasília, 1990.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA JR., R. S.; REGITANO, J. B.; TORMENA, C. A.; TORNISIELO, V. L.; CONSTANTIN, J. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação de herbicidas comercializados no estado do Paraná. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 313-323, 2003.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; ALONSO, D. G. Potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007.

INOUE, M.H.; POSSAMAI, A.C.S.; MENDES, K.F.; BEN, R.; MATOS, A.K.A.; SANTOS, E.G. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cana-de-açúcar em solos contrastantes. **Bioscience Journal** v. 30, p. 659-665, 2014.

JHALA, A. J.; RAMIREZ, A. H. M.; SINGH, M. Leaching of indaziflam applied at two rates under different rainfall situations in Florida dandler soil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 88, n. 3, p. 326-332, 2012.

KAAPRO, J.; HALL, J. Indaziflam, a new herbicide for pre-emergent control of weeds in turf, forestry, industrial vegetation and ornamentals. **Pakistan Journal Weed Science Research**, v.18, n.esp., p.267-270, 2012.

KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M. Destino ambiental dos herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, v.27, n.3, p.629-639, 2009.

LIU, Y.; XU, Z.; WU, X.; GUI, W.; ZHU, G. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. **Journal Hazardous Materials**, v. 178, n. 1-3, p. 462-468, 2010.

MAPA – **Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 14/03/2018.

MELO, C. A. D.; MEDEIROS, W. N.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; TIBURCIO, R. A. S.; FERREIRA, L. R. Lixiviação de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen no perfil de três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 385-392, 2010.

REFATTI, J. P.; AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; MANICA-BERTO, R.; CAS BUNDT, A.; ELGUEIRA, D. B. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, 2014.

ROCHA, P. R. R., FARIA, A. T., BORGES, L. G. F. C., SILVA, L. O. C., SILVA, A. A. e FERREIRA, E. A. Sorção e dessorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, 31, 231-238, 2013.

ROMERO, A. C. R.; TEIXEIRA, M. F. F.; NEVES, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; SILVA, A. A.; FURTADO, I. F.; OLIVEIRA, A. F. Development and validation of a solid-liquid extraction with low temperature partitioning (SLE/LTP) method for determination of the herbicide indaziflam in brazilian soils by high performance liquid chromatography (HPLC-UV/Vis). **Journal of Experimental Agriculture International**, 21(3): 1-8, 2018.

SILVA, L. O. C.; SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; LIMA, C. F.; SILVA, L. L.; D'ANTONINO, L. Mobilidade do ametryn em Latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 30, n. 4, p. 883-890, 2012.

SILVA, A. A.; FERREIRA, A. F.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, J. B. Métodos de controle de plantas daninhas. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Universidade Federal de Viçosa, 2013. p.63-81.

SILVA, A. A.; VIVIAN, R.; OLIVEIRA JR., R. S. Herbicidas: Comportamento no solo. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. p.189-248.

SOUZA, A. P. **Atividade de oxyfluorfen, 2,4-D e glifosate em solos de diferentes texturas na presença e na ausência de composto orgânico**. 1994. 71 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

VIVIAN, R.; GUIMARÃES, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; SILVA, A. A.; REIS, M. R.; SANTOS, J. B. Adsorção e dessorção de trifloxysulfuron-sodium e ametryn em solos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 97-109, 2007.

U.S. EPA. **Pesticide fact sheet**. Conditional registration, 108 pp, 2010.

LIXIVIAÇÃO DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DIFERENTES VALORES DE pH DETERMINADA PELA TÉCNICA DA PLANTA INDICADORA E CROMATOGRAFIA LÍQUIDA

Resumo - A mobilidade do herbicida aplicado em pré-emergência, nos primeiros centímetros do perfil do solo, é indispensável para que o produto entre em contato com as sementes e as raízes das plantas daninhas. No entanto, esse movimento não deve ultrapassar a camada superficial, pois pode ocorrer perda na eficiência agrônômica e contaminação de águas subterrâneas. Para avaliar a mobilidade do herbicida pode-se utilizar a técnica da planta indicadora e/ou da cromatografia. Visando comparar a eficiência desses métodos na avaliação da lixiviação do indaziflam e o efeito da elevação do pH do solo em sua mobilidade, conduziu-se o presente estudo. Utilizou-se dois solos brasileiros, com diferentes características físicas e químicas (Latosolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo), cada solo com dois níveis de pH (5,1 e 6,1). O experimento foi conduzido no esquema de parcelas subdivididas, no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelos solos e as subparcelas constituíram-se de 10 camadas de profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 e 45-50 cm) em colunas de PVC de 10 cm de diâmetro por 50 cm de comprimento. O trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira, em casa de vegetação, que consistiu no preparo das colunas, aplicação do indaziflam (100 g ha^{-1}), simulação da chuva (60 mm) e plantio/avaliação da planta indicadora e a segunda realizada em laboratório, onde o herbicida foi extraído das amostras de solo provenientes de cada segmento da coluna e analisado no aparelho de cromatografia líquida de alta eficiência. Verificou-se que a elevação do pH dos dois solos de 5,1 para 6,1, aumentou a lixiviação do indaziflam. O método da planta indicadora se mostrou mais sensível na detecção do indaziflam que método da CLAE, principalmente em maiores profundidades. Além do pH, o teor de matéria orgânica e a granulometria são características que afetam a lixiviação do indaziflam nos solos estudados.

Palavras-chave: herbicida no solo, mobilidade, coluna de solo, bioensaio.

LEACHING INDAZIFLAM IN SOILS WITH DIFFERENT pH VALUES DETERMINED BY INDICATOR PLANT TECHNIQUES AND LIQUID CHROMATOGRAPHY

Abstract - The mobility of the herbicide applied in pre-emergence, in the first centimeters of the soil profile, is indispensable so that the product comes into contact with the seeds and roots of weeds. However, this movement should not exceed the surface layer, as it may result in loss of agronomic efficiency and contamination of groundwater. To evaluate the mobility of the herbicide, the indicator plant technique and/or chromatography may be used. In order to compare the efficiency of these methods in the evaluation of indaziflam leaching and the effect of elevation of soil pH on its mobility, the present study was conducted. Two Brazilian soils, with different physical and chemical characteristics (Red Yellow Latosol and Cambisol), were used, each soil with two pH levels (5.1 and 6.1). The experiment was conducted in a split - plot scheme, in a completely randomized design with four replications. The plots were composed of soils and the subplots consisted of 10 layers of depths (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 and 45-50 cm) in PVC columns of 10 cm in diameter by 50 cm in length. The work was developed in two stages, the first, in a greenhouse, which consisted of the preparation of the columns, application of the Indaziflam (100 g ha^{-1}), rain simulation (60 mm) and planting/evaluation of the indicator plant, and the second in the laboratory, where the herbicide was extracted from the soil samples from each segment of the column and analyzed in the high efficiency liquid chromatography apparatus (HPLC). It was found that raising the pH of both soils from 5.1 to 6.1 increased the indaziflam leaching. The method of the indicator plant showed to be more sensitive detecting indaziflam than the method of HPLC, mainly in greater depths. Besides pH, organic matter content and grain size are characteristics that affect indaziflam leaching in the studied soils.

Key words: herbicide in soil, mobility, soil column, bioassay.

INTRODUÇÃO

O movimento descendente dos herbicidas ao longo do perfil do solo, denominado lixiviação, é considerado o principal processo de incorporação superficial da maioria dos herbicidas aplicados em pré-emergência, possibilitando o contato do produto com o banco de semente das plantas daninhas presente no solo (Silva et al., 2016). No entanto, quando os herbicidas são carregados para camadas profundas, abaixo da região onde se concentra o banco de sementes, pode haver prejuízos, por reduzir a eficiência agrônômica do produto e potencializar o risco de contaminação dos corpos de água. (Monquero et al., 2014; Silva et al., 2016).

A ocorrência do processo de lixiviação dos herbicidas, está relacionada principalmente com a baixa sorção desses produtos aos colóides do solo (Rocha et al., 2013), indicando dependência desses processos. Assim, pode-se considerar que as características físico-químicas do solo e dos herbicidas que influenciam a sorção, também são responsáveis diretamente pela mobilidade do herbicida ao longo do perfil do solo (Guerra et al., 2016).

O Indaziflam, (N-[(1R,2S)-2,3-dihydro-2,6-dimethyl-1H-inden-1-yl]-6-[(1R)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine) é recomendado para uso em pré-emergência (MAPA, 2016), ou seja, é aplicado na superfície do solo entrando em contato com as sementes impedindo a germinação, crescimento e desenvolvimento da planta (Guerra et al., 2016).

Classificado como ácido fraco, esse herbicida possui valor de $pK_a=3,5$ (Tompkins, 2010), o que faz com que se apresente na forma dissociada, nas condições mais comuns dos solos tropicais agricultáveis (valor de pH do solo 5,0 a 6,5, $> pK_a$ do produto). Isso, associado ao fato de a maioria dos solos apresentarem carga elétrica líquida negativa, contribui para que sua sorção seja baixa, tornando-o mais susceptível ao processo de lixiviação. Por ser um herbicida recentemente registrado para uso no Brasil, ainda são poucos os estudos que tratam desse assunto em condições de solos brasileiros (Guerra et al., 2016), onde predominam minerais 1:1, como a caulinita, com baixa capacidade de expansão e cargas dependentes de pH.

Estudos mostram que herbicidas como o indaziflam, que apresentam polaridade, podem ter a sua disponibilidade na solução do solo diretamente influenciada pelo valor de pH, apresentando-se sorvido com maior ou menor força o que irá afetar a intensidade de movimentação no perfil do solo, a atividade agrônômica, bem como o risco de contaminação de águas subterrâneas (Castro Netto, 2014; Pereira, 2016).

A movimentação dos herbicidas no perfil do solo pode ser avaliada pelo método da planta indicadora ou por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). O método cromatográfico demanda utilização de equipamentos de custo elevado para a análise dos compostos, por meio de cromatografia líquida ou gasosa. Já o método da planta indicadora é considerado de menor custo, pois envolve a utilização de plantas sensíveis ao herbicida, as quais são capazes de detectá-lo em baixíssimas concentrações, que muitas vezes não são detectadas pelo método cromatográfico (Silva et al., 2016). Entretanto, esse último, não possibilita a quantificação do herbicida, enquanto que a cromatografia viabiliza a detecção e quantificação do composto que se encontra livre e ativo no solo (Freitas et al., 2012 e Silva et al., 2016). Desse modo, pode-se destacar que cada método apresenta uma peculiaridade e eficiência satisfatória para cada situação.

Diante do exposto, o objetivo dessa pesquisa foi comparar a eficiência de dois métodos de detecção da lixiviação de herbicidas (planta indicadora e cromatográfico) e o efeito do pH do solo na mobilidade desse produto, utilizando dois solos brasileiros com características distintas, com dois níveis de pH (5,1 e 6,1).

MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliados dois solos, coletados na camada de 0 - 20 cm de profundidade, em áreas sem histórico de aplicação de herbicidas: Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), da região de Viçosa-MG e Cambissolo (RQ), da região de Santa Vitória-MG.

As amostras dos solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 4 mm, e então, divididas em duas subamostras, sendo uma mantida com o pH natural (5,1) e a outra teve o pH corrigido para 6,1, por meio de curva de neutralização de acidez, utilizando calcário dolomítico PRNT de 80%. Na Tabela 1 encontram-se os resultados das análises física e química das amostras dos respectivos solos com e sem calagem.

Tabela 1 – Caracterização física e química das amostras de solo utilizadas no experimento

Análise física													
Solo	Areia			Silte			Argila			Classe textural			
	(Dag Kg ⁻¹)												
LVA – Viçosa, MG	43,0			7,0			50,0			Argilo-arenosa			
RQ – Santa Vitória, MG	81,0			4,0			15,0			Areia-franca			
Análise química													
Solo	pH	P	K	Ca	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	MO
	(H ₂ O)	(mg dm ⁻³)		(Cmolc dm ⁻³)							(%)		(dag kg ⁻¹)
LVA – Viçosa, MG Sem calagem	5,1	2,2	33	3,4	0,1	0,00	5,45	3,58	3,58	9,03	40	0	3,47
LVA – Viçosa, MG Com calagem	6,1	2,9	41	4,7	0,1	0,00	3,30	4,90	4,90	8,20	60	0	3,47
RQ – Santa Vitória, MG Sem calagem	5,1	69,6	23	1,0	0,6	0,2	2,97	1,66	1,86	4,63	36	11	1,86
RQ – Santa Vitória, MG Com calagem	6,1	71,9	27	2,7	1,0	0,0	1,30	3,70	3,70	5,20	56	12	1,86

Análises realizadas no Laboratório de Análises de Solo Viçosa Ltda. pH: água, KCl e CaCl₂- relação 1:2,5. P-K: Extrator Mehlich 1. Ca-Mg e Al: Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹. H + Al – Acidez potencial – Extrator: acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; SB - Soma de bases trocáveis; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; T – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – Índice de saturação de bases; m - Índice de saturação de alumínio; MO – Matéria orgânica

O estudo foi conduzido utilizando o esquema de parcelas subdivididas, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelos quatro substratos (solos) e as subparcelas constituíram-se de 10 camadas de profundidades com intervalos de 5 cm (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 e 45-50 cm) em colunas de PVC de 10 cm de diâmetro por 50 cm de comprimento, conforme metodologia empregada por Andrade et al. (2010b) e Freitas et al. (2012).

Os solos foram acondicionados nas colunas previamente preparadas, marcadas lateralmente a cada 5 cm de distância, e parafinadas no seu interior para evitar escoamento lateral da água. As colunas contendo os solos foram saturadas com água, segundo metodologia utilizada por Freitas et al. (2012). Em seguida, utilizando um pulverizador costal pressurizado com CO₂, equipado com duas pontas TTI 110.02, espaçados de 0,5 m, mantidas a pressão de 2,5 bar, aplicando-se o equivalente a 150 L ha⁻¹ de calda, aplicou-se o indaziflam na dose 100 g ha⁻¹, no topo das colunas, as quais permaneceram em repouso por 12 horas, antes de receberem a chuva simulada. Durante a aplicação da chuva o volume de água que atingia cada coluna foi monitorado por pluviômetros, fixados na lateral das colunas, até que fosse atingido 60 mm, no intervalo de

3 horas. Posteriormente, as colunas foram mantidas novamente em repouso por 72 horas para drenagem do excesso de água remanescente.

Terminado o tempo de repouso, as colunas foram colocadas na posição horizontal e seccionadas a cada 5,0 cm de profundidade (10 profundidades), para coleta das amostras do substrato. De cada amostra proveniente do segmento de 5 cm foram coletadas cerca de 10 gramas de solo, sendo esse seco ao ar, destorroado e armazenado em freezer à temperatura de aproximadamente -20°C para posterior extração e quantificação do herbicida por cromatografia. O restante do solo obtido do segmento foi acondicionado em vasos com capacidade de 300 cm^3 , onde foram semeadas cinco sementes de sorgo (*Sorghum bicolor*), espécie utilizada como indicadora da presença do indaziflam (Braga, 2017). Esses vasos permaneceram em casa de vegetação por 21 dias, sendo aplicada solução nutritiva a base de NPK + micronutrientes em intervalos de sete dias e a umidade mantida por meio de irrigações.

Aos 21 dias após a aplicação do herbicida (DAA) foi realizada a avaliação visual do índice de intoxicação, atribuindo-se notas de 0 (germinação e desenvolvimento normal das plantas) a 100 (ausência de germinação ou morte da planta) e o acúmulo de matéria seca total (parte aérea+raiz) das plantas. Para isso, as plantas foram cortadas rente à superfície do solo e as raízes foram lavadas em água corrente até eliminação de todo o substrato e, em seguida o material (parte aérea e raízes) foi colocado em sacolas de papel e levados à estufa de circulação forçada de ar ($70 \pm 2^{\circ}\text{C}$) até atingir massa constante, para posterior determinação da massa da matéria seca.

Para realização da análise por CLAE, seguiu-se a metodologia proposta por Romero et al. (2017), em que 2,000 g do solo anteriormente congelado é transferido para tubos falcon de tampa rosqueável com capacidade para 50,0 mL onde, posteriormente, foram adicionados 14,0 mL da mistura extratora, composta por 4,0 mL de água (pH 7); 8,1 mL de acetonitrila e 1,9 mL de acetato de etila. Em seguida, os tubos contendo solo + solução extratora foram submetidos à agitação, utilizando um equipamento denominado vortex, durante 1 minuto e, então, foram mantidos por 4 horas em freezer à temperatura de aproximadamente -20°C .

Após o período de repouso no freezer, realizou-se a filtração da fração não congelada (herbicida + solventes) em filtro milipore, para balão volumétrico de 10,0 mL. O filtrado obtido, após atingir a temperatura ambiente, foi transferido para um balão de fundo redondo com capacidade para 10,0 mL, para evaporação dos solventes em evaporador rotatório, à temperatura de $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$, por ± 4 minutos. Após a evaporação dos solventes, os

resíduos do herbicida contido no balão foram lavados com três alíquotas de 0,50 mL de acetonitrila e filtrado em membrana de 0,45 µm, para ser armazenado em “vials” de 1,5 mL de capacidade, para análise.

Utilizou-se um aparelho de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), modelo Shimadzu LC 20AT Japão, com detector UV/vis (Schimadzu SPD-20A) e coluna de aço inoxidável C18 (VP, ShimadzuShim-pack ODS 150 x 6 mm x 4 mm id.). Como fase móvel aplicou-se acetonitrila e água (acidificada com 0,01% de ácido acético) na proporção de 60:40 (V:V), com volume de injeção de 20 µL, a um fluxo de 1,0 mL min⁻¹ e comprimento de onda de 212 nm, a temperatura de 30 °C; condições que resultaram no tempo de retenção do indaziflam igual a 4,6 minutos. A quantificação foi realizada por meio da comparação das áreas obtidas nos cromatogramas após realização dos ensaios e a identificação, pelo tempo de retenção, foi feita mediante comparação com o padrão analítico do indaziflam.

Para interpretação dos resultados referentes tanto ao ensaio biológico (intoxicação e matéria seca total da planta indicadora) quanto ao de cromatografia líquida de alta eficiência, as médias dos valores obtidas em cada profundidade, com seus respectivos desvios padrões, foram plotados em gráficos de barras e analisados de forma descritiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No LVA com pH de 5,1, verificou-se intoxicação severa das plantas de sorgo (>70%) nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm da coluna (Figura 1A), resultando, conseqüentemente, em menor crescimento de plantas, verificado pelo menor acúmulo de matéria seca total (Figura 1B). Na profundidade de 10-15 cm da coluna as plantas apresentaram leves sintomas de intoxicação (<15%), com pequena redução no acúmulo de matéria seca total das plantas (Figura 1B). Abaixo de 15 cm de profundidade na coluna não foram observados sintomas de intoxicação e comprometimento no desenvolvimento das plantas de *S. bicolor* (Figuras 1A e 1B) o que indica ausência ou níveis muito baixos de indaziflam nas camadas mais profundas da coluna. A análise por CLAE detectou presença do indaziflam, no LVA pH=5,1, apenas no primeiro segmento da coluna (0-5 cm) (Figura 1C)

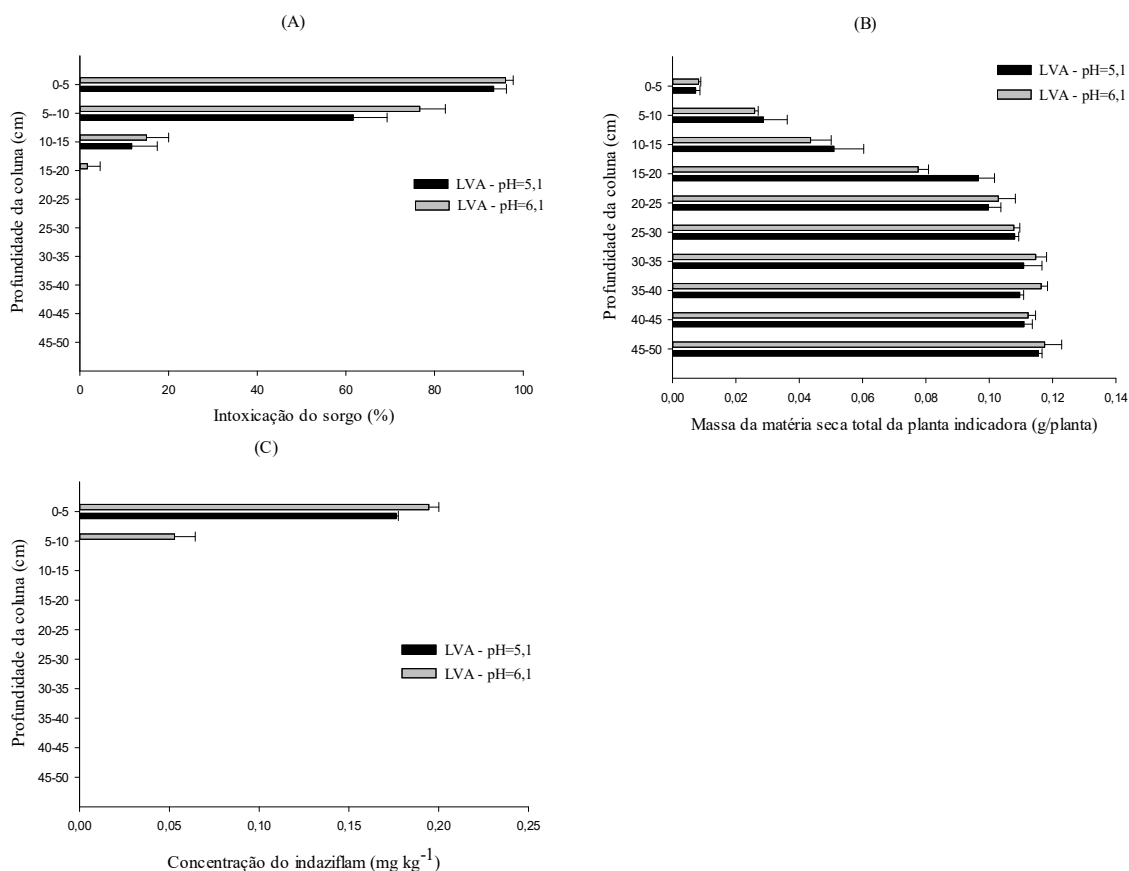


Figura 1- Porcentagem de intoxicação das plantas de *S. bicolor* (A), massa da matéria seca total das plantas de *S. bicolor* (B) e concentração de indaziflam obtido por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (C) no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com dois valores de pH (5,1e 6,1), nas diferentes profundidades da coluna, após a aplicação do indaziflam (100 g ha⁻¹) e simulação de 60 mm de chuva.

Quando realizada a calagem e conseqüente elevação do pH para 6,1, verificou-se sintomas de intoxicação das plantas até a profundidade de 20 cm (Figura 1A) e menor acúmulo de matéria seca total até essa mesma profundidade (Figura 1B). Também, nessa condição de pH, verificou-se que a análise por CLAE detectou o indaziflam até 10 cm de profundidade (Figura 1C).

No Cambissolo (RQ) pH=5,1, os sintomas de intoxicação nas plantas de *S. bicolor* foram verificados até a profundidade de 15 cm (Figura 2A), com menor incremento na matéria seca total das plantas até essa mesma profundidade (Figura 2B). Enquanto que na análise por CLAE o herbicida foi detectado até o seguimento de 5 a 10 cm, porém em menor concentração que a detectada no seguimento de 0 a 5 cm (Figura 2C).

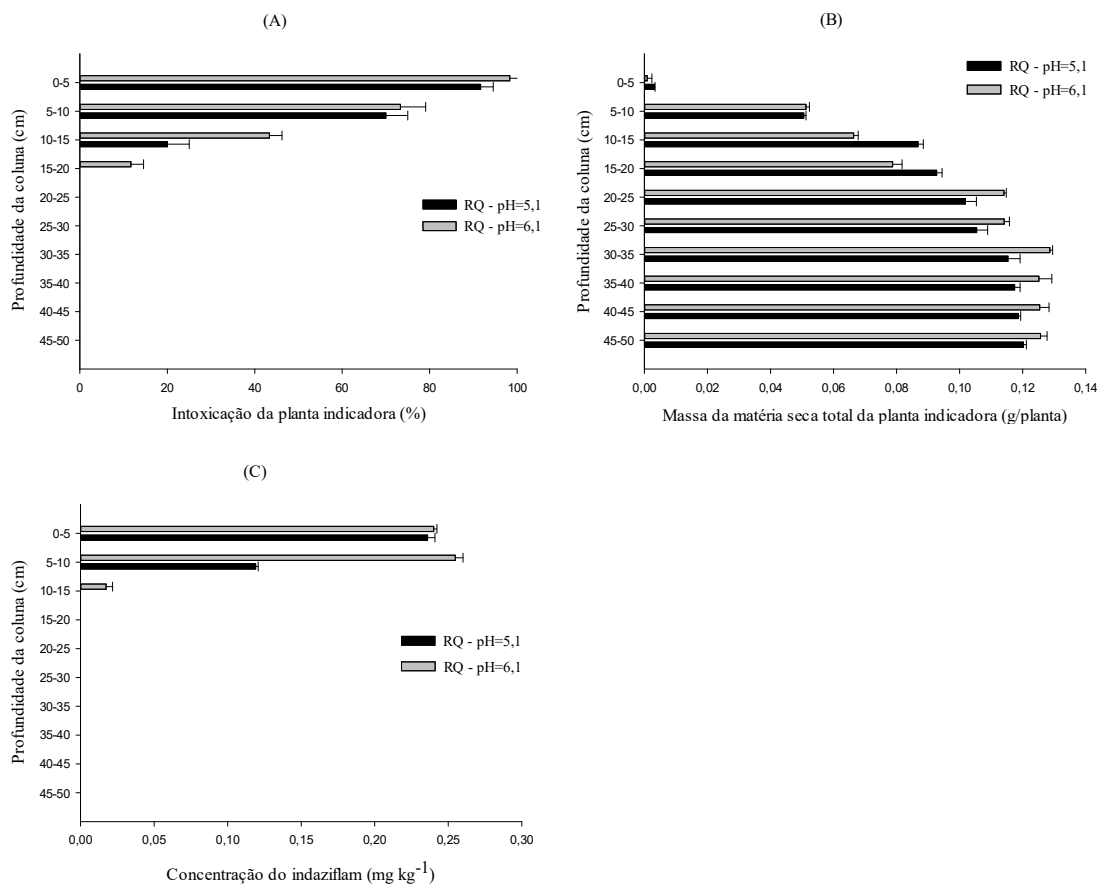


Figura 2- Porcentagem de intoxicação das plantas de *S. bicolor* (A), massa da matéria seca total das plantas de *S. bicolor* (B) e concentração de indaziflam obtido por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (C) no Cambissolo (RQ) com dois valores de pH (5,1 e 6,1), nas diferentes profundidades da coluna, após a aplicação do indaziflam (100 g ha⁻¹) e simulação de 60 mm de chuva.

Ao elevar o valor de pH desse solo de 5,1 para 6,1, observou-se comportamento semelhante ao verificado para o LVA, isto é, houve maior lixiviação do indaziflam, o qual foi detectado em maiores profundidades, haja vista que houve intoxicação e redução no acúmulo de matéria seca das plantas de *S. bicolor* até 20 cm de profundidade (Figuras 2A e 2B). Pelo método da cromatografia constatou-se presença do indaziflam até a profundidade de 15 cm (Figura 2C).

Como já discutido no capítulo anterior do presente estudo, a sorção do indaziflam é menor com o maior valor de pH do solo, fato que contribui diretamente para maior lixiviação do herbicida, conforme constatado no presente capítulo. Maior lixiviação, nesse caso, se deve ao fato de que em condições de menor sorção, o herbicida encontrar-se livre na solução do solo, podendo ser facilmente carregado com o fluxo descendente de água para maiores profundidades.

A capacidade sortiva de um herbicida no solo é a condição que determinará a intensidade de ocorrência da lixiviação, desse modo entende-se que a sorção dos herbicidas, principalmente os que são aplicados em pré emergência, não deve ser muito elevada para que o mesmo possa ser levado até os primeiros 10 cm de solo onde irão exercer seu efeito sobre sementes e/ou plântulas durante a germinação ou emergência (Monquero et al., 2014). Por outro lado, deve-se considerar a sorção como o principal processo que atua impedindo que ocorra a lixiviação em excesso, o que acarretaria em redução da eficácia pela percolação do produto no perfil do solo, além de resultar em possibilidade de contaminação do lençol freático (Monquero et al., 2014; Braga et al., 2016).

Guerra et al. (2016), utilizando um Latossolo Vermelho, de textura franco argilo arenosa, constataram que após a simulação de 60 mm de chuva a maior concentração do indaziflam foi encontrada nos primeiros 15 cm de solo. Esse fato mostra, mais uma vez, que a sorção desse produto permite o seu movimento mais intenso apenas nos primeiros centímetros do solo, região onde se encontra a maioria das sementes de plantas daninhas.

A maior mobilidade do indaziflam com a elevação do pH está relacionada com a diminuição da sorção, que por sua vez é influenciada, principalmente, pelo valor de pKa (3,5). Por ser um ácido fraco pode, dependendo do pH do meio, apresentar-se de duas formas quanto à sua carga líquida. A primeira seria a forma molecular, cuja carga líquida é zero, observada em condições de pH abaixo de 3,4 e nesta situação forma inativa no solo. A segunda seria na forma aniônica, com carga líquida negativa, observada na situação em que o valor de pH da solução do solo se aproxima da neutralidade (Mangels, 1991), fazendo com que ocorra diminuição da força de atração entre as moléculas do herbicida e as cargas negativas predominantes no solo, diminuindo a capacidade de sorção do herbicida e elevando o risco de lixiviação do produto para camadas profundas (Castro neto, 2014; Silva et al., 2016).

Silva et al. (2014), avaliando a mobilidade do fomesafen, que têm características semelhantes a indaziflam, ou seja se comporta como ácido fraco, verificaram que em condições de solo com valor de pH mais elevado o herbicida encontra-se mais suscetíveis à lixiviação, condição semelhante a observada para o indaziflam no presente estudo.

Os resultados de intoxicação e acúmulo de matéria seca apresentaram relação inversa, ou seja, em condições de maior intoxicação verificou-se menor acúmulo de matéria seca total pelas plantas (Figuras 1A e 1B). Isso ocorre pelo fato de o herbicida

impedir a biossíntese de celulose, constituinte principal da parede celular, e consequentemente a formação da célula e o crescimento da planta (Brabham et al, 2014).

O acúmulo de matéria seca total da planta indicadora se comporta como uma variável de boa precisão para o estudo do comportamento no solo do indaziflam, pois se a planta apresenta sintomas de intoxicação, consequentemente a sua taxa de crescimento será alterada, diferente do observado para os herbicidas glyphosate e ametrym estudados, respectivamente, por Velini et al. (2008) e Freitas et al. (2012). De acordo com esses autores, baixas doses desses herbicidas podem causar sintomas nas plantas sem, contudo, alterar o acúmulo de matéria seca total das mesmas.

De maneira geral, pode-se considerar que houve maior movimentação do indaziflam no RQ que no LVA. Isso possivelmente foi favorecido pelas características físicas e químicas do RQ (Tabelas 1), principalmente a textura mais arenosa e o baixo teor de matéria orgânica, características capazes de exercer grande influência sobre a movimentação dos herbicidas no perfil do solo (Silva et al., 2016).

Estudos indicam que solos com elevado teor de areia e baixos teores de matéria orgânica apresentam maior susceptibilidade a lixiviação de herbicidas, o que eleva o risco de transporte desses produtos até o lençol freático (Liu et al., 2010; Faustino et al., 2015; Freitas, et al., 2014; Silva et al., 2016). Em condições de solos brasileiros, à grande maioria altamente intemperizados, com predomínio de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e argilas silicatadas 1:1, a matéria orgânica possui importante papel na sorção dos herbicidas, portanto, se o teor de matéria orgânica é baixo os herbicidas estarão mais susceptíveis a movimentarem no perfil do solo (Procópio et al., 2001).

Os resultados encontrados no presente estudo corroboram com Freitas et al. (2012) e Braga et al. (2016), os quais verificaram que a mineralogia, o teor de matéria orgânica e o pH são importantes características físico-químicas dos solos que devem ser consideradas no momento da recomendação dos herbicidas, no intuito de garantir eficiência técnica e sustentabilidade ambiental.

Dos métodos utilizados para avaliar a lixiviação do indaziflam no presente estudo, pode-se afirmar que o método da planta indicadora foi mais eficaz para detecção desse herbicida, pois em todas as situações foi o que detectou a presença do produto em maiores profundidades da coluna. No entanto, esse método não possibilitou a quantificação da concentração do indaziflam nesses segmentos. A CLAE apresentou menor sensibilidade de detecção nas maiores profundidades. Todavia deve-se destacar que, essa apresenta uma importante vantagem que é quantificar a concentração do herbicida livre e ativo ao longo

da coluna de solo, mostrando quanto de produto existe em cada seguimento (Silva et al., 2012; Braga et al., 2016). Ressalta-se, também, que a baixa dose do herbicida (100 g ha^{-1}) dificulta sua detecção por meio de cromatografia e, ao mesmo tempo, indica alta sensibilidade das plantas indicadora, associando-se ao fato de que no capítulo I deste trabalho verificou-se baixo nível de sorção para os respectivos solos, com valores de K_f inferiores a 10, favorecendo a detecção das plantas indicadoras.

Apesar de não ter sido possível quantificar a concentração do herbicida no método da planta indicadora, o mesmo possibilitou a obtenção de resultados satisfatórios na detecção de resíduos do indaziflam, sem a necessidade de usar laboratórios sofisticados e de grandes quantidades de solventes e outros produtos químicos, que podem contaminar o meio ambiente, conforme relatado por Melo et al. (2010) e Freitas et al. (2012).

No entanto, é importante considerar que para melhor entendimento dos eventos ocorridos deve-se utilizar também o método cromatográfico, pois os resultados serão mais claros, uma vez que será aliada a maior sensibilidade de detecção da planta indicadora, à capacidade de quantificação da substância pela CLAE, conforme relatado por Braga et al. (2016).

CONCLUSÕES

A lixiviação do indaziflam tanto no Latossolo Vermelho-Amarelo quanto no Cambissolo é maior quando o pH desse é elevado.

O método da planta indicadora possui maior capacidade de detectar menores concentrações do indaziflam que o método da cromatografia líquida de alta eficiência.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, S. R. B.; SILVA, A. A.; LIMA, C. F.; D'ANTONINO, L.; QUEIROZ, M. E. L. R.; FRANÇA, A. C.; FELIPE, R. S.; VICTORIA FILHO, R. Lixiviação do ametryn em Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, com diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, v. 28, n. 3, p. 655-663, 2010b.

BRABHAM, C.; LEI, L.; GU, Y.; STORK, J.; BARRETT, M.; DeBOLT, S. Indaziflam herbicidal action: a potent cellulose biosynthesis inhibitor. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1177-1185, 2014.

BRAGA, D. F.; FREITAS, F. C. L.; ROCHA, P. R. R.; ARAÚJO, A. G. D.; MELO, V. C. Leaching of sulfentrazone in soils from the sugarcane region in the northeast region of Brazil. **Planta Daninha**, v. 34, n. 1, p. 161-169, 2016.

BRAGA, R. R. **Sorção de indaziflam e isoxaflutole em solos tropicais**. 2017. 54f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2017.

CASTRO NETO, M. D. **Sorção, lixiviação e persistência de imidazolinonas em solos utilizados no sistema Clearfield de cultivo de arroz**. 2014. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

FAUSTINO, L. A.; FREITAS, M. A. M.; PASSOS, A. B. R. J.; SARAIVA, D. T.; FARIA, A. T.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R. Mobilidade do sulfentrazone em solos com diferentes características físicas e químicas. **Planta Daninha**, v. 33, n. 4, p. 795, 2015.

FREITAS, F. C. L.; SILVA, A. A.; SILVA, L. O. C.; ROCHA, P. R. R.; GUIMARÃES, F. C. N.; FREITAS, M. A. M.; FELIPE, R. S. Mobilidade do ametryn em solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 641-648, 2012.

FREITAS, M. A. M.; PASSOS, A. B. R. J.; TORRES, L. G.; MORAES, H. M. F.; FAUSTINO, L. A.; ROCHA, P. R. R.; SILVA, A. A. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta Daninha**, v. 32, n. 2, p. 385-392, 2014

GUERRA, N.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GEMELLI, T. M. C. J.; GUERRA, A. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 11, n. 1, p.42-53, 2016.

GUERRA, N.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GEMELLI, A.; PEREIRA JÚNIOR, D. M.; GUERRA, A. Persistence of biological activity and leaching potential of herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam in soils with different textures. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 345-355, 2016.

LIU, Y.; XU, Z.; WU, X.; GUI, W.; ZHU, G.. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1, p. 462-468, 2010.

MANGELS, G. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil - a review of the literature. In: SHANER, D. L.; O'CONNOR, S. L. (Eds.). **The imidazolinone herbicides**. Boca Raton: CRC, 1991. p.191-209.

MAPA – **Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 22/03/2017.

MELO, C. A. D.; MEDEIROS, W. N.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; TIBURCIO, R. A.; FERREIRA, L. R. Lixiviação de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen no perfil de três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 385-392, 2010.

MONQUERO, P. A.; BRAGA, E. N.; MALARDO, M. R. Manejo de *Merremia aegyptia* com misturas de herbicidas utilizando diferentes lâminas de água e na presença ou ausência de palha de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.13, n.2, p.88-96, 2014.

PEREIRA, G. A. M. **Comportamento do clomazone em solos tropicais**. 2016. 75f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PROCÓPIO, S. D. O.; SILVA, A. A. D.; SANTOS, J. B. D.; FERREIRA, L. R.; MIRANDA, G. V.; SIQUEIRA, J. G. Efeito da irrigação inicial na profundidade de lixiviação do herbicida s-metolachlor em diferentes tipos de solo. **Planta Daninha**, v. 19, n. 3, p. 409-417, 2001.

ROCHA, P. R. R., FARIA, A. T., BORGES, L. G. F. C., SILVA, L. O. C., SILVA, A. A. e FERREIRA, E. A. Sorção e dessorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, 31, 231-238, 2013.

ROMERO, A. C. R.; TEIXEIRA, M. F. F.; NEVES, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; SILVA, A. A.; FURTADO, I. F.; OLIVEIRA, A. F. Development and validation of a solid-liquid extraction with low temperature partitioning (SLE/LTP) method for determination of the herbicide indaziflam in brazilian soils by high performance liquid

chromatography (HPLC-UV/Vis). **Journal of Experimental Agriculture International**, 21(3): 1-8, 2018.

SILVA, G. R.; D'ANTONINO, L.; FAUSTINO, L. A.; SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; TEIXEIRA, C. C.; COSTA, A. I. G. Mobility of fomesafen in brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 639-645, 2014.

SILVA, M. A.; ARAGÃO, N. C.; BARBOSA, M. A.; JERONIMO, E. M.; Carlin, S. D. Efeito osmótico de glyphosate no desenvolvimento inicial de cana-de - açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 4, 2009.

SILVA, K. S.; FREITAS, F. C. L.; BRAGA D. F.; DOMBROSKI, J. L. D.; SANTOS, A. F. B. Ametryn leaching in soils from the sugarcane region in northeastern brazilian. **Planta Daninha**, v. 34, n. 4, p. 839-847, 2016.

TOMPKINS, J. **Pesticide fact sheet: indaziflam**. United States, Environmental Protection Agency. Disponível em: <http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

VELINI, E. D.; ALVES, E.; GODOY, M. C.; MESCHEDE, D. K.; SOUZA, R. T.; DUKE, S. O. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

MOBILIDADE DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM ATRIBUTOS DISTINTOS

Resumo - Um herbicida utilizado em pré-emergência será eficiente no controle das plantas daninhas se estiver disponível na solução do solo na camada de 0-10 cm, região onde se localiza a maioria das sementes das plantas daninhas presentes no banco do solo. Nas situações em que o herbicida é transportado para camadas mais profundas, ele perde a eficiência agrônômica e se tornar um problema ambiental, podendo causar contaminação do solo e de águas subterrâneas. No presente estudo, avaliou-se a mobilidade do indaziflam em cinco solos de diferentes regiões do Brasil com atributos distintos (Latossolo Vermelho-Eutrófico de Paulínia (SP); Argissolo Vermelho-Amarelo, de Taquaritinga (SP); Argissolo Vermelho-Amarelo, de Oratórios (MG); Argissolo Vermelho-Amarelo, de Viçosa, (MG) e Latossolo Vermelho-distrófico, de Uberlândia (MG)) utilizando o método da planta indicadora. O experimento foi conduzido, utilizando colunas de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, no esquema de parcelas subdivididas, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Nas parcelas foram alocadas as colunas, preenchidas com os solos, e nas subparcelas as profundidades das colunas, (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 e 45-50 cm). No topo das colunas preenchidas com os solos e umedecidos até a capacidade de campo foi aplicado o indaziflam na dose correspondente a 100 g ha⁻¹. Doze horas após aplicação, foi simulada chuva equivalente a 60 mm e as colunas foram mantidas em repouso por 72 horas. Após o repouso as colunas foram seccionadas em blocos de 5,0 cm e o solo contido em cada segmento homogeneizado e colocado em vasos, onde foi cultivado *Sorghum bicolor*, como espécie indicadora, por 21 dias, ocasião em que avaliou-se a intoxicação e o acúmulo de matéria seca total das plantas (parte aérea+raiz). Maior lixiviação do herbicida ocorreu nas colunas preenchidas com Latossolo Vermelho-Eutrófico de Paulínia (SP), sendo verificada intoxicação das plantas e menor incremento no acúmulo de matéria seca total até 20 cm de profundidade. Nos demais solos a maior concentração do herbicida foi detectado pela planta indicadora apenas no segmento de 0-5 cm da coluna. Concluiu-se que a lixiviação do indaziflam é maior no solo que possui pH mais elevado, maior porcentagem de areia e menor teor de matéria orgânica.

Palavras-chave: Lixiviação, bioensaio, herbicida, pH do solo.

MOBILITY OF INDAZIFLAM IN SOILS WITH DIFFERENT ATTRIBUTES

Abstract - A herbicide used in pre-emergence will be efficient in controlling weeds if it is available in the soil solution in the 0-10 cm layer, where most of the weed seeds are located in the soil bank. In situations where the herbicide is transported to deeper layers, it loses agronomic efficiency and becomes an environmental problem, which can cause contamination of soil and groundwater. In the present study, the mobility of indaziflam was evaluated in five soils of different regions of Brazil with different attributes (Red-Eutrophic Latosol of Paulínia (SP), Red-Yellow Argissolo of Taquaritinga (SP), Red-Yellow Argisol, from Oratorios (MG), Red-Yellow Argisol, from Viçosa (MG) and Red-dystrophic Latosol, from Uberlândia (MG)) using the indicator plant method. The experiment was conducted using PVC columns of 10 cm in diameter and 50 cm in length, in the scheme of subdivided parcels, in a completely randomized design with four replications. In the plots were allocated the columns, filled with soils, and in the subplots the depths of the columns (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 and 45-50 cm). At the top of the columns filled with soils and moistened to the field capacity indaziflam was applied at the dose corresponding to 100 g ha⁻¹. Twelve hours after application, rain equivalent to 60 mm was simulated and the columns were kept at rest for 72 hours. After standing, the columns were sectioned in 5.0 cm blocks and the soil contained in each homogenized segment was placed in pots where *Sorghum bicolor* was cultivated as indicator for 21 days, when it was evaluated the intoxication and accumulation of total dry matter of the plants (aerial part + root). Higher leaching of the herbicide occurred in the columns filled with Red-Eutrophic Latosol of Paulínia (SP), being verified intoxication of the plants and smaller increase in the accumulation of total dry matter up to 20 cm depth. In the other soils the highest herbicide concentration was detected by the indicator plant only in the 0-5 cm column segment. It was concluded that indaziflam leaching is higher in soil with higher pH, higher percentage of sand and lower organic matter content.

Key words: Leaching, bioassay, herbicide, soil pH.

INTRODUÇÃO

A mobilidade dos herbicidas é um fenômeno que possui grande importância quando se trata da dinâmica desses produtos no ambiente, podendo ser considerada a principal forma de incorporação dos herbicidas aplicados em pré-emergência, para que esses atinjam sementes e/ou plantas em germinação. No entanto, é ideal que o movimento do herbicida se dê apenas nos primeiros 10 cm do solo, pois do contrário o seu efeito agrônômico será limitado e o risco de causar contaminação dos corpos de água subterrâneos será potencializado (Monquero et al., 2014).

A capacidade de o herbicida se mover no solo está relacionada com as características da própria molécula, são elas: solubilidade, adsorvidade, constante de dissociação ácida (pKa), coeficiente de sorção normalizado para o teor de carbono orgânico do solo (Koc), coeficiente de partição octanol-água (Kow). Além disso, têm-se a influência dos atributos dos solos onde são aplicados (teor de argila e matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, capacidade de troca aniônica e umidade) (Amim et al., 2014). Assim, uma das maneiras para minimizar o efeito negativo do uso de herbicidas é conhecer suas principais características e as interações com os atributos do solo, onde o mesmo será utilizado e, também, suas interações (Silva et al., 2016).

O indaziflam (N-[(1R,2S)-2,3-dihydro-2,6-dimethyl-1H-inden-1-yl]-6-[(1R)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine) é registrado no portal do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, para uso em pré-emergência de plantas daninhas, principalmente monocotiledôneas, nas culturas de café, cana-de-açúcar, eucalipto, pinus e citros (MAPA, 2016). Esse herbicida pertence à classe química “alkylazine” e tem como mecanismo de ação a inibição da biossíntese de celulose, tendo efeito direto sobre a formação e o crescimento da parede celular (Guerra et al., 2013). Como características relevantes desse produto, pode-se destacar o efeito residual prolongado no controle de plantas daninhas (> 150 dias) (U. S. EPA, 2010; Brosnan et al., 2012; Bayer, 2010), baixa solubilidade em água (0,0028 kg m⁻³ a 20 °C) e pKa=3,5 (Bayer, 2010).

Em solos de regiões de clima temperado formados por minerais de argila expansíveis (2:1) de maior área superficial específica, como a montmorilonita e a vermiculita, estudos mostram que o indaziflam pode ser classificado como herbicida moderadamente móvel ou pouco móvel no perfil do solo, com maior concentração nos primeiros centímetros da superfície (Alonso et al., 2011; Jhala et al., 2012; Jhala & Singh, 2012). Além disso, pode-se dizer que a lixiviação do indaziflam é maior em solos com baixo teor de matéria orgânica (<0,5 %) e com maior valor de pH (próximo de 6,0) (Jhala & Singh, 2012).

Por se tratar de uso recente no Brasil, pouco se sabe a respeito da dinâmica do indaziflam no solo, sobretudo no que se refere a ocorrência do processo de lixiviação nas condições de solos tropicais, os quais apresentam cargas dependentes de pH e são formados, a grande maioria, por minerais de argila pouco expansíveis (1:1) como a caulinita.

No presente estudo, objetivou-se avaliar a mobilidade do indaziflam em solos do Brasil, com distintas características físicas e químicas, utilizando a técnica da planta indicadora, a qual apresentou, nos trabalhos descritos nos capítulos I e II do presente estudo, eficiência satisfatória para realização desse estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliadas amostras de cinco solos brasileiros, caracterizados física e quimicamente (Tabela 1), coletados à profundidade de 0 a 20 cm: Latossolo Vermelho-Eutrófico (LVef), de Paulínia (SP); Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA-1), de Taquaritinga (SP); Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA-2), de Oratórios (MG); Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA-3), de Viçosa, (MG) e Latossolo Vermelho-Distrófico (LVd), de Uberlândia (MG).

Tabela 1 - Caracterização física e química das amostras de solo utilizadas no experimento. LVef - Latossolo Vermelho-Eutrófico (LVef), de Paulínia (SP); PVA - 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo, de Taquaritinga (SP); PVA - 2 - Argissolo Vermelho-Amarelo, de Oratórios (MG); PVA - 3 - Argissolo Vermelho-Amarelo de Viçosa, (MG); LVd - Latossolo Vermelho-Distrófico, de Uberlândia (MG)

Análise física														
Solo	Areia		Silte		Argila		Classe textural							
	(Dag Kg ⁻¹)													
LVef	36,5		11,3		52,2		Argila							
PVA -1	77,5		4,4		18,1		Franco arenoso							
PVA - 2	68,1		9,9		22,0		Franco argilo arenoso							
PVA - 3	26,7		15,3		58,0		Argila							
LVd	48,3		0,1		51,6		Argila arenosa							
Análise química														
Solo	pH	P	K	Ca	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	M	MO	P-Rem
	(H ₂ O)	(mg dm ⁻³)	(Cmolc dm ⁻³)							(%)		(dag kg ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	
LVef	5,82	10,0	135	1,9	0,79	0,29	6,1	3,1	3,3	9,2	33,3	8,7	2,30	23,9
PVA - 1	5,33	4,8	48	2,7	1,12	0,00	2,6	3,9	3,9	6,5	60,2	0,0	1,54	38,8
PVA - 2	5,33	15,4	29	1,7	0,62	0,10	3,1	2,4	2,6	5,5	43,1	4,1	1,28	41,1
PVA - 3	5,02	35,4	93	12,4	1,53	0,00	3,5	14,1	14,1	17,6	80,2	0,0	2,43	29,1
LVd	4,85	5,8	11	3,5	0,95	0,00	3,1	4,5	4,5	7,6	59,0	0,0	3,84	25,3

Análises realizadas no Laboratório de Análises de Solo Viçosa Ltda. pH: água, KCl e CaCl₂- relação 1:2,5. P-K: Extrator Mehlich 1. Ca-Mg e Al: Extrator: KCl - 1 mol L⁻¹. H + Al - Acidez potencial - Extrator: acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹. ; SB - Soma de bases trocáveis; t - Capacidade de troca catiônica efetiva; T - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V - Índice de saturação de bases; m - Índice de saturação de alumínio; MO - Matéria orgânica

As amostras foram destorroadas, peneiradas (4 mm) e acondicionadas em colunas de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, marcadas e seccionadas a cada 5 cm de distância. No preparo prévio, as colunas foram parafinadas em seu interior, para evitar caminhos preferenciais para a água nas bordas, seguindo metodologia utilizada por Freitas et al. (2012).

As colunas previamente preparadas foram preenchidas com os solos e colocadas em recipiente contendo volume de água até o nível de 80% da altura da coluna, onde permaneceram por 48 horas para saturação do solo. Após o tempo de saturação as mesmas foram retiradas da água e permaneceram em repouso por 72 horas para drenagem do excesso de água, conforme descrito por Andrade et al. (2010b).

Em seguida procedeu-se a aplicação do indaziflam (100 g ha⁻¹) utilizando-se um pulverizador costal pressurizado a CO₂, calibrado para aplicar 150 L ha⁻¹ de calda, equipado com duas pontas TTI 110.02, espaçados de 0,5 m, mantidos à pressão de 3 bar. No momento da aplicação a temperatura era de 23,6°C, umidade relativa do ar 69% e

velocidade do vento 1,8 Km h⁻¹. Após a aplicação, as colunas permaneceram em repouso por 12 horas e então foi realizada a simulação da chuva equivalente a 60 mm, em intervalo de três horas, verificado por meio de pluviômetros fixados à parede lateral das colunas.

Após simulação da chuva, as colunas foram mantidas novamente em repouso por 72 horas e, após esse tempo, foram colocadas na posição horizontal e seccionadas em blocos de 5,0 cm, para retirada do solo o qual foi homogeneizado e colocado em vasos com capacidade de 300 cm³, onde foi cultivada espécie indicadora *sorghum bicolor*, conforme recomendação de Braga (2017), por 21 dias. Durante a condução do experimento as plantas foram adubadas com solução equilibrada a base de NPK+micronutrientes e irrigadas, assegurando-se condições favoráveis ao seu desenvolvimento.

O experimento foi conduzido no esquema de parcelas subdivididas, no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelas colunas preenchidas com os solos, e as subparcelas, pela profundidade de coleta das amostras de solo nas colunas (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40 e 45-50 cm).

Aos 21 dias após a semeadura, foi avaliada a porcentagem de intoxicação das plantas de sorgo, atribuindo-se notas de 0 (emergência e desenvolvimento normal da planta) a 100 (Ausência de germinação ou morte da planta) de acordo com escala da ALAM (1974) modificada. Também nessa época avaliou-se o acúmulo de matéria seca total das plantas (matéria seca de raiz + matéria seca de parte aérea), obtida em balança de precisão, após as plantas serem secas em estufa de circulação forçada de ar quente (aproximadamente 60°C).

Os dados obtidos foram tabulados e suas médias apresentadas com seus respectivos desvios padrão para observação da capacidade de lixiviação do indaziflam nos diferentes solos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sintomas de intoxicação nas plantas de *Sorghum bicolor* proporcionados pelo indaziflam se caracterizaram por inibição da germinação e limitação no desenvolvimento da planta, com maior comprometimento sobre as raízes das plantas, as quais apresentam-se pouco desenvolvidas e com diâmetro muito espeço, características que as tornam pouco eficientes na absorção de água e nutrientes. Em razão disso, verificou-se que nas condições de maior intoxicação, houve menor acúmulo de matéria seca total das plantas (Figuras 1 e 2). Conforme descrito por Guerra et al. (2013) e Brabham et al. (2014), o indaziflam impede a formação de novas células da parede celular em algum ponto na etapa da

reticulação das microfibrilas de celulose, impedindo a divisão e o alongamento das células e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento da planta.

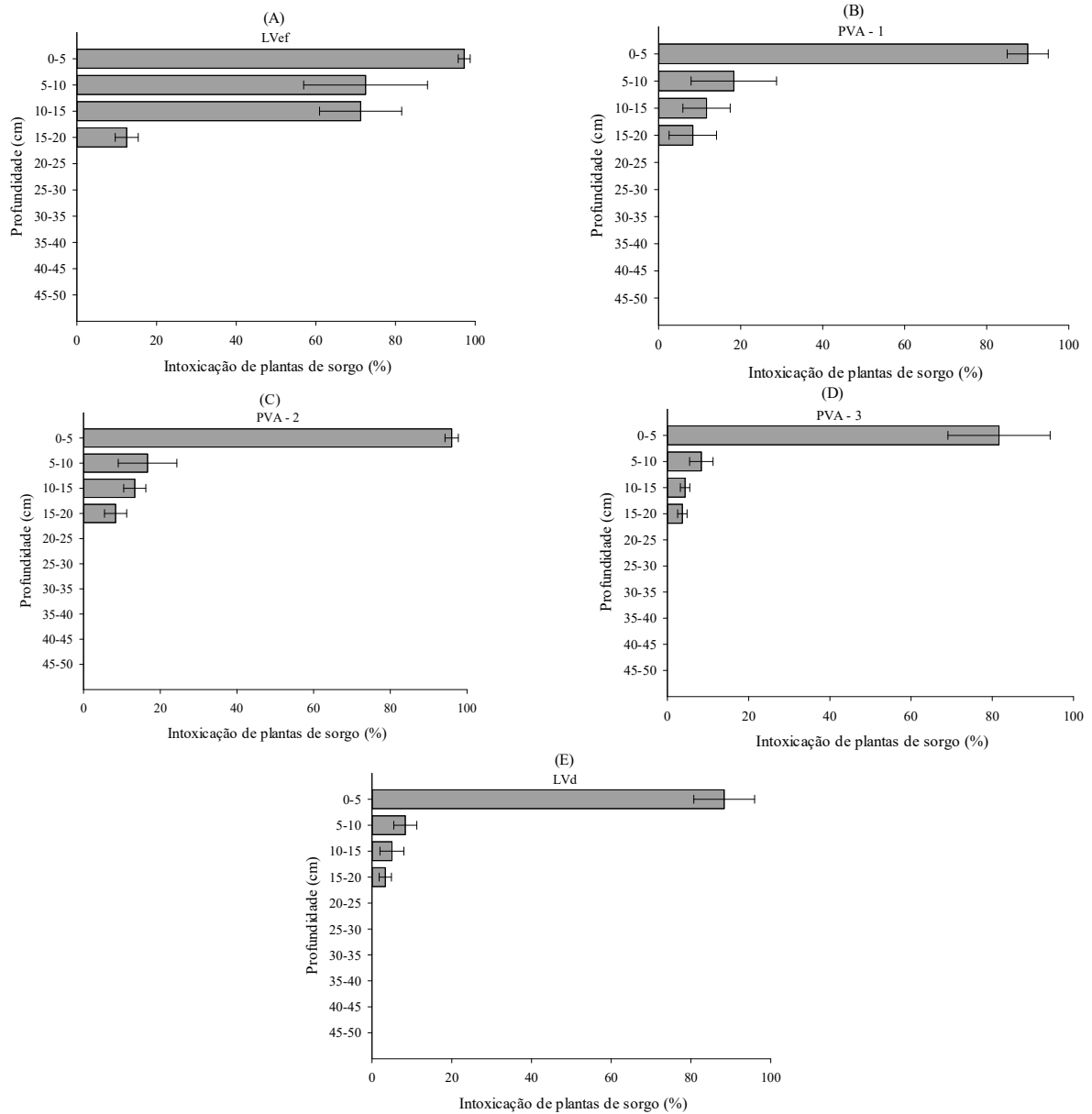


Figura 1 – Porcentagem de intoxicação de plantas de sorgo, aos 21 dias após o plantio, ao longo da coluna preenchida com os solos: LVef - Latossolo Vermelho-Eutrófico, de Paulínia-SP (A); PVA - 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Taquaritinga-SP (B); PVA - 2 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Oratórios-MG (C); PVA - 3 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Viçosa-MG (D) e LVd – Latossolo Vermelho-Distrófico, de Uberlândia-MG (E), e submetida a simulação de chuva equivalente a 60 mm.

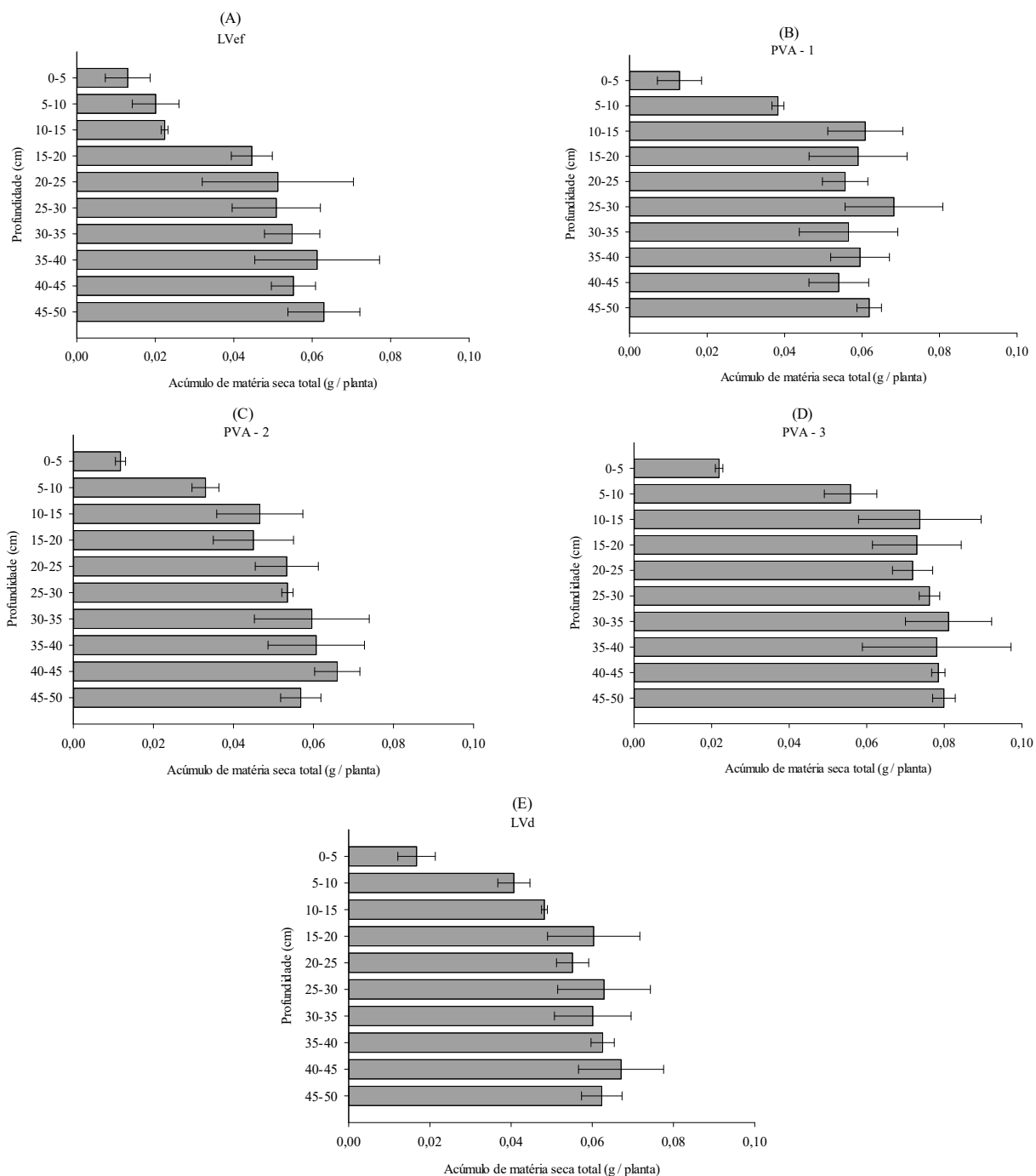


Figura 2 – Massa da matéria seca total das plantas de sorgo, aos 21 dias após o plantio, ao longo da coluna preenchida com os solos LVef - Latossolo Vermelho-Eutrófico, de Paulínia-SP (A); PVA - 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Taquaritinga-SP (B); PVA - 2 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Oratórios-MG (C); PVA - 3 – Argissolo Vermelho-Amarelo, de Viçosa-MG (D) e LVd – Latossolo Vermelho-Distrófico, de Uberlândia-MG (E), e submetidas a simulação de chuva equivalente a 60 mm.

Maior porcentagem de intoxicação e menor acúmulo de matéria seca total, foram observados nas plantas cultivadas em amostras coletadas na profundidade de 0-5 cm das

colunas para todos os substratos (Figuras 1 e 2), o que indica presença do indaziflam na região de maior concentração das sementes e raízes das plantas daninhas. A mobilidade de um herbicida nos primeiros 5 cm do solo é fundamental para a incorporação superficial do produto de forma a possibilitar melhor controle do banco de sementes das plantas daninhas (Florido et al., 2015; Amim et al., 2016).

Nas amostras de solo extraídas do segundo e terceiro segmentos da coluna, 5-10 e 10-15 cm de profundidade, as plantas cultivadas no L_{Vef} apresentaram maior porcentagem de intoxicação e menor acúmulo de matéria seca total, que nos demais solos, onde também foram observados os sintomas de intoxicação (Figuras 1A e 2A). O L_{Vef} é, dentre os solos estudados, o que apresentou maior valor de pH (Tabela 1), o que indica que essa característica influencia fortemente a mobilidade do indaziflam. Braga (2017) avaliando a sorção do indaziflam nesses mesmos solos, constatou que esse herbicida foi menos sorvido no L_{Vef} e associou esse fato ao seu maior valor de pH. Por ser o indaziflam caracterizado como um ácido fraco, esse se apresenta na forma dissociada (forma aniônica) na solução do solo que possui valor de pH próximo da neutralidade, o que faz com que diminua as forças de atração entre herbicida e colide do solo, diminuindo, por consequência, a capacidade de sorção do herbicida.

Em análise de correlação realizada por Braga (2017), onde considerou-se a influência das características dos solos utilizados no presente estudo e a capacidade desses em sorver o indaziflam, constatou-se que o pH, seguido do teor de matéria orgânica foram as características que mais tiveram efeito sobre a sorção do herbicida. Na condição de maior valor de pH e menor teor de matéria orgânica têm-se menor sorção do indaziflam e consequentemente maior potencial de lixiviação, corroborando com o verificado neste estudo.

A maior disponibilidade de cargas negativas associadas aos colóides, quando se eleva o valor de pH do solo, podem intensificar a repulsão das moléculas do indaziflam, diminuindo sua sorção, pois nessa condição o herbicida encontra-se, predominantemente, na forma aniônica (cargas negativas), sendo, portanto, repelido pelas cargas negativas existentes na superfície dos colóides (Florido et al., 2015). O valor de pH dos solos é uma importante característica que altera o estado de ionização das moléculas dos herbicidas, dessa forma, têm-se alteração da sua dinâmica nos solos, tornando-os mais ou menos susceptíveis à ocorrência do processo de lixiviação (Regitano et al., 2001 e Guerra et al., 2014).

A influência do pH na mobilidade dos herbicidas que apresentam valores de pKa considerados baixos ou classificados como ácidos fracos foi, também, verificada por Florido et al. (2015). Segundo esses autores o imazaquin, que possui valor de pKa=3,8 (próximo ao do indaziflam), apresentou maior mobilidade em um Latossolo Vermelho com pH=6,0, sendo detectado até 20 cm de profundidade. Eles atribuíram esses resultados à menor retenção do herbicida aos colóides do solo.

No PVA - 1 e PVA - 2, os sintomas do indaziflam na planta indicadora cultivada nas amostras de solo extraídas das profundidades de 5-10 e 10-15 cm da coluna, são mais evidentes que no PVA - 3 e no LVd (Figuras 1E e 2E). Isso pode ser atribuído, principalmente, ao maior valor de pH e menor teor de matéria orgânica daqueles solos em relação aos dois últimos (Tabela 1). Menor teor de matéria orgânica e maior pH do solo contribuíram com a redução na capacidade sorçiva do indaziflam, conforme descrito por Braga (2017), tornando-o mais disponíveis na solução do solo, o que irá favorecer a lixiviação.

Além do pH e do teor de matéria orgânica, a textura mais arenosa do PVA - 1 e PVA - 2 (Tabela 1) podem ter contribuído para lixiviação do indaziflam. Nesses solos, o maior teor de areia favorece a percolação de água no perfil e, conseqüentemente, maior movimento do herbicida por fluxo de massa, influenciando sua atividade na camada superficial e potencializando o risco de contaminação de águas subterrâneas (Castro Neto, 2014).

No PVA - 3 e LVd observou-se maior porcentagem de intoxicação e menor acúmulo de matéria seca total da planta indicadora, apenas nos primeiros 5 cm da coluna, o que pode ser associado à maior concentração do indaziflam nesse segmento da coluna. Esses solos são, dentre os estudados, os que apresentam menor pH e maior teor de matéria orgânica (Tabela 1), características que, conforme mencionado anteriormente, aumentam a sorção do indaziflam, fazendo com que esses estejam menos disponíveis na solução do solo e, portanto, menos susceptível à ocorrência da lixiviação.

A retenção do indaziflam à matéria orgânica se dá pela interação via ligações de hidrogênio entre o herbicida e à MO, a qual é considerada ligação muito forte e difícil de ser quebrada, o que acaba sendo uma barreira à lixiviação do herbicida (Florido et al., 2015). Segundo Silva et al. (2014) a MO desempenha papel fundamental quando se trata de substâncias com potencial para contaminação ambiental, como os herbicidas, pois aumenta a sorção e limita a sua movimentação no perfil do solo. Jhala et al. (2012) avaliando a lixiviação do indaziflam em solos de regiões temperadas, cultivados com

citrus, constataram que a mobilidade foi maior em solos com teores de matéria orgânica menores que 0,5%, considerados baixos.

Apesar de ter sido constatado no presente estudo que o pH é a característica de maior importância na lixiviação do indaziflam nos solos estudados, deve-se ainda considerar o efeito da matéria orgânica e da textura dos solos na mobilidade desse herbicida.

Abaixo de 20 cm de profundidade da coluna, a planta indicadora não apresentou sintomas indicando a ausência do indaziflam nessa posição da coluna em todos solos estudados, fato que indica que não houve lixiviação do herbicida para profundidades maiores que 20 cm.

CONCLUSÕES

A ordem decrescente da relação de lixiviação do indaziflam do nos solos estudados foi: Latossolo Vermelho-Eutrófico (LVef), de Paulínia (SP) > Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), de Taquaritinga (SP) > Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), de Oratórios (MG) > Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), de Viçosa, (MG) > Latossolo Vermelho-Distrófico (LVd), de Uberlândia (MG)

Os solos com maior valor de pH, menor teor de matéria orgânica e maior teor de areia, foram os que apresentaram os maiores riscos de lixiviação do indaziflam.

REFERÊNCIAS

ALONSO, D. G.; KOSKINEN, W. C.; OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; MISLANKAR, S. Sorption-desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 24, p. 13096-13101, 2011.

AMIM, R.T.; FREITAS, S.P.; FREITAS, I.L.J.; GRAVINA, G.A.; PAES, H.M.F. Controle de plantas daninhas pelo indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 791-800, 2014.

AMIM, R. T.; FREITAS, S. P.; FREITAS, I. L. J.; SCARSO, M. F. Banco de sementes do solo após aplicação de herbicidas pré-emergentes durante quatro safras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p.1710-1719, 2016.

ANDRADE, S. R. B.; SILVA, A. A.; LIMA, C. F.; D'ANTONINO, L.; QUEIROZ, M. E. L. R.; FRANÇA, A. C.; FELIPE, R. S.; VICTORIA FILHO, R. Lixiviação do ametryn em Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, com diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, v. 28, n. 3, p. 655-663, 2010b.

BAYER ENVIRONMENTAL SCIENCE. **Specticle Herbicide Technical Bulletin**; 2010; 16 pp.

BRABHAM, C.; LEI, L.; GU, Y.; STORK, J.; BARRETT, M.; DEBOLT, S. Indaziflam herbicidal action: a potent cellulose biosynthesis inhibitor. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1177-1185, 2014.

BRAGA, R. R. **Sorção de indaziflam e isoxaflutole em solos tropicais**. 2017. 54f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2017.

BROSNAN, J. T., BREEDEN, G. K., MCCULLOUGH, P. E., & HENRY, G. M. Pre and Post control of annual bluegrass (*Poa annua*) with indaziflam. **Weed Technology**, v. 26, n. 1, p. 48-53, 2012.

CASTRO NETO, M. D. **Sorção, lixiviação e persistência de imidazolinonas em solos utilizados no sistema clearfield de cultivo de arroz**. 2014. 65f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

DE MALEZAS, Asociación Latinoamericana. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. **Alam**, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.

FLORIDO, F.; DIAS, A. C. R.; MONQUERO, P. A.; TORNISIELO, V. Mobilidade do herbicida imazaquin em diferentes solos. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 54 – 60, jul. – set., 2015.

FREITAS, F. C. L.; SILVA, A. A.; SILVA, L. O. C.; ROCHA, P. R. R.; GUIMARÃES, F. C. N.; FREITAS, M. A. M.; FELIPE, R. S. Mobilidade do ametryn em solos da região semiárida do rio grande do norte. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 641-648, 2012.

GUERRA, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. de; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA NETO, A. M. de; BRAZ, G. B. P. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.12, n.3, p.285-295, set./dez. 2013.

GUERRA, N.; OLIVEIRA NETO, A. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; TAKANO, H. K. Sensibility of plant species to herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 609-617, 2014.

JHALA, A. J.; RAMIREZ, A. H. M.; SINGH, M. Leaching of indaziflam applied at two rates under different rainfall situations in Florida dandler soil. **Bull Environ Contam Toxicol**, v. 88, n. 3, p. 326-332, 2012.

JHALA, A. J.; SINGH, M. Leaching of indaziflam compared with residual herbicides commonly used in Florida citrus. **Weed Technology**, v. 26, n. 3, p. 602-607, 2012.

MAPA – **Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 22/03/2017.

MONQUERO, P. A.; BRAGA, E. N.; MALARDO, M. R. Manejo de *Merremia aegyptia* com misturas de herbicidas utilizando diferentes lâminas de água e na presença ou ausência de palha de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.13, n.2, p.88-96. 2014.

PEREIRA, G. A. M.; BARCELLOS JUNIOR, L. H. ; GONCALVES, V. A. ; SILVA, D. V. ; SILVA, A. A. Estimativa da lixiviação do clomazone em colunas de solos utilizando métodos biológicos. **Planta Daninha**, v. 35, 2017.

REFATTI, J. P.; AVILA, L. A. de; AGOSTINETTO, D.; MANICA-BERTO, R.; DA CAS BUNDT, A.; ELGUEIRA, D. B. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.44, n.6, 2014.

REGITANO, J. B.; ALLEONI, L. R. F.; TORNISIELO, V. L. Atributos de solos tropicais e a sorção de imazaquin. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 801-807, 2001.

ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; BORGES, L. G. F. C.; SILVA, L. O. C.; SILVA, A. A.; FERREIRA, E. A. Sorção e dessorção do diuron em quatro Latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 31, n. 1, p. 231-238, 2013

SILVA, G. R.; D'ANTONINO, L.; FAUSTINO, L. A.; SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; TEIXERA, C. C. e COSTA, A. I. G. Mobilidade do fomesafen em solos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 639-645, 2014.

SILVA, K. S.; FREITAS, F. C. L.; BRAGA, D. F.; DOMBROSKI, J. L. D.; SANTOS, A. F. B. Ametryn Leaching in Soils from the Sugarcane Region in Northeastern Brazilian. **Planta Daninha**, v. 34, n. 4, p. 839-848, 2016.

U.S. EPA. **Pesticide fact sheet**. Conditional registration, 108 pp, 2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que os herbicidas aplicados em pré-emergência tem como destino principal o solo, é de grande importância o conhecimento das interações existentes entre esses e o solo para que a recomendação seja realizada de forma correta, tanto do ponto de vista agrônomo quanto ambiental.

Nesta pesquisa estudou-se o comportamento do indaziflam (sorção e lixiviação) em solos provenientes de várias regiões do Brasil, os quais apresentam distintas características físicas e químicas. Ficou evidenciado que a sorção e a lixiviação do indaziflam variam com os atributos dos solos e que o pH é o que mais influencia o comportamento deste herbicida nestes solos, seguido pela matéria orgânica. Desse modo, é importante ficar atento para a prática da calagem, uma vez ela altera o pH do solo e isso pode afetar diretamente a disponibilidade do indaziflam na solução do solo, bem como a dose recomendada.

Esta pesquisa também mostrou que o método da planta indicadora é eficiente para o estudo da sorção e da lixiviação do indaziflam, com resultados semelhantes ao da cromatografia líquida de alta eficiência. É importante ressaltar que a cromatografia é mais eficiente quando se deseja quantificar o herbicida livre e ativo em solução de uma amostra de solo, enquanto que a planta indicadora é mais recomendada para indicar a presença do herbicida sem a preocupação de quantificá-lo. Desse modo, a indicação de um ou de outro método irá depender do objetivo proposto. Caso seja apenas indicar a presença do herbicida, sem a preocupação de quantificação mais exata do mesmo no solo, o método da planta indicadora é mais vantajoso, pois apresenta facilidade de execução e com menor custo.