

WENDEL MAGNO DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DO SOLO NA SORÇÃO E LIXIVIAÇÃO  
DO INDAZIFLAM EM SOLOS TROPICAIS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

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

T

S729i  
2018 Souza, Wendel Magno de, 1994-  
Influência dos atributos do solo na sorção e lixiviação do  
indaziflam em solos tropicais / Wendel Magno de Souza. –  
Viçosa, MG, 2018.  
viii, 76f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Francisco Cláudio Lopes de Freitas.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Indaziflam (Herbicida) - Absorção e adsorção. 2. Solos -  
Movimento de herbicidas. 3. Toxicologia ambiental.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Fitotecnia.  
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.

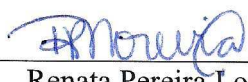
CDD 22. ed. 632.954

WENDEL MAGNO DE SOUZA

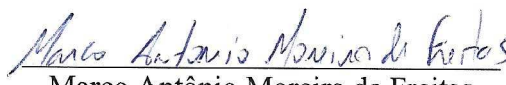
**INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DO SOLO NA SORÇÃO E LIXIVIAÇÃO  
DO INDAZIFLAM EM SOLOS TROPICAIS**

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

APROVADA: 23 de julho de 2018.



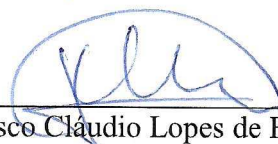
Renata Pereira Lopes Moreira



Marco Antônio Moreira de Freitas



Leonardo d'Antonino  
(Coorientador)



Francisco Cláudio Lopes de Freitas  
(Orientador)

“Errar ontem, aprender hoje, superar amanhã. Não espere o futuro mudar sua vida, porque o futuro será consequência do presente”

*(Racionais MC's)*

Aos meus pais Maria Aparecida e  
Adalberto e a minha irmã Raiane.

**Dedico**

iii

## AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre está ao meu lado me dando forças e me protegendo, nos momentos felizes e tristes.

Aos meus pais Maria Aparecida e Adalberto, pelo amor e carinho incondicional e por acreditarem em mim em todos os momentos, me aconselhando e me apoiando em minhas decisões.

À minha irmã Raiane, pela paciência, conselhos, ensinamentos e por sempre estar ao meu lado.

À Ariana Mussulin, pelo amor e carinho durante esse trajeto percorrido.

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação acadêmica e pela oportunidade de estar finalizando esta etapa.

Ao Departamento de Fitotecnia da UFV pela oportunidade de poder aprimorar meus conhecimentos.

Ao meu orientador Francisco Cláudio Lopes de Freitas pela confiança, ensinamentos e conselhos.

Ao meu coorientador Leonardo d'Antonino, pelos conhecimentos e experiência passados, e aos professores Antônio Alberto e Paulo Cecon pelas valiosas sugestões.

Agradeço a todos integrantes do grupo em Manejo Integrado de Plantas Daninhas, pelos ótimos anos de convivência e amizade. Em especial ao Matheus, Hugo, Rodrigo Faria, Valdinei, Roxana, Ivan, Luiz e Julinho.

Ao Guilherme Gama, pela amizade e ajuda na condução do experimento.

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.

Enfim, agradeço a todos que torceram por mim. MUITO OBRIGADO!

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	4
<b>ATRIBUTOS DOS SOLOS NA SORÇÃO E DESSORÇÃO DO INDAZIFLAM.....</b>	<b>7</b>
Resumo .....	7
Abstract.....	8
INTRODUÇÃO .....	9
MATERIAL E MÉTODOS .....	11
Tempo de equilíbrio.....	13
Sorção .....	13
Dessorção.....	14
HPLC .....	14
Análises estatísticas .....	15
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	16
CONCLUSÕES .....	25
REFERÊNCIAS.....	26
<b>SORÇÃO DO INDAZIFLAM EM DUAS PROFUNDIDADES DOS SOLOS.....</b>	<b>31</b>
Resumo .....	31
Abstract.....	32
INTRODUÇÃO .....	33
MATERIAL E MÉTODOS .....	34
Sorção do indaziflam por meio de bioensaio.....	35
Sorção e dessorção do indaziflam por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) .....	37
Tempo de equilíbrio.....	37
Sorção do indaziflam .....	38
Dessorção do indaziflam.....	38
HPLC .....	39
Análises estatísticas .....	39
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
Sorção do indaziflam por método biológico .....	39
Sorção do indaziflam por método cromatográfico.....	43
CONCLUSÕES .....	48

REFERÊNCIAS.....	49
<b>LIXIVIAÇÃO DO INDAZIFLAM EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SUBMETIDO A PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS DE 60 E 240 MM.....</b>	<b>54</b>
Resumo .....	54
Abstract.....	55
INTRODUÇÃO .....	56
MATERIAL E MÉTODOS .....	57
Montagem das colunas.....	58
Aplicação do herbicida .....	59
Simulação das precipitações pluviais.....	59
Bioensaio .....	59
Método cromatográfico.....	60
Análise dos dados .....	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS.....	70
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76

## RESUMO

SOUZA, Wendel Magno de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Influência dos atributos do solo na sorção e lixiviação do indaziflam em solos tropicais.** Orientador: Francisco Cláudio Lopes de Freitas. Coorientador: Leonardo d'Antonino

O indaziflam é um herbicida que possui elevado residual no solo, o que pode implicar em risco de contaminação ambiental, a depender de aspectos relacionados ao potencial de sorção e lixiviação deste nos solos. Dessa maneira torna-se necessário compreender o comportamento do indaziflam em solos tropicais, buscando minimizar o risco de contaminação dos ecossistemas e sua eficiência no controle de plantas daninhas. Nesta pesquisa foram realizados três experimentos. No primeiro foi determinada a sorção e dessorção do indaziflam em solos de diferentes regiões brasileiras, utilizando-se a cromatografia líquida de alta eficiência, onde se buscou avaliar quais características dos solos estão associados a esses processos. No segundo avaliou a sorção e dessorção do indaziflam em dois solos, coletados a campo em diferentes profundidades e, no terceiro, avaliou-se o potencial de lixiviação do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo, coletado em duas profundidades submetidas a diferentes lâminas de precipitação pluvial. Os dois últimos experimentos foram realizados utilizando tanto métodos cromatográficos quanto os biológicos. Houve correlação significativa entre o teor de matéria orgânica do solo e o coeficiente de sorção ( $K_f$ ) para solos com maiores valores de pH. A sorção foi maior nas camadas superficiais dos solos, quando comparadas as camadas mais inferiores. Em solos que a sorção foi maior, ocorreu maior dessorção, evidenciando o retorno do indaziflam para a solução do solo. Ocorreu o fenômeno de histerese em todos os solos, demonstrando que a maior porcentagem do indaziflam sorvida permaneceu ligada aos colóides do solo. Em camadas inferiores do Latossolo Vermelho-Amarelo, onde o teor de matéria orgânica foi menor, o indaziflam tendeu a maior percolação, chegando a ser detectado até 35 cm de profundidade. Concluiu-se que a sorção e dessorção do indaziflam foram influenciadas pelos atributos dos solos, sendo a matéria orgânica o principal fator associado. Além disso, em camadas mais profundas do solo a sorção foi menor, o que aliado a maior precipitação pluvial promoveu maior mobilidade do indaziflam no Latossolo Vermelho-Amarelo.

## ABSTRACT

SOUZA, Wendel Magno de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Influence of soil attributes on sorption and indaziflam leaching on tropical soils.** Advisor: Francisco Cláudio Lopes de Freitas. Co-advisor: Leonardo d'Antonino.

Indaziflam is an herbicide that has a high residual in the soil, which may imply risks of environmental contamination, depending on aspects related to its sorption and leaching potentials in the soil. Thus, it is necessary to understand the behavior of indaziflam in tropical soils, in order to minimize the risk of contamination of ecosystems and their efficiency in controlling weeds. In this present research three experiments were carried out. In the first one, sorption and desorption of indaziflam in soils of different Brazilian regions were determined using high performance liquid chromatography, which sought to evaluate which soil characteristics are associated to these processes. In the second experiment, indaziflam sorption and desorption were evaluated in two soils collected in the field at different depths, and in the third indaziflam leaching potential was evaluated in Red-Yellow Latosol, collected at two depths. The last two experiments were performed using both chromatographic and biological methods. There was a significant correlation between the organic matter content of the soil and the sorption coefficient ( $K_f$ ) for soils with higher pH values. The sorption was higher in the superficial layers of the soils when compared to the lower layers. In soils that sorption was greater, higher desorption occurred, evidencing the return of indaziflam to the soil solution. The hysteresis phenomenon occurred in all soils, showing that the highest percentage of indaziflam sorbed remained bound to soil colloids. In lower layers of the Red Yellow Latosol, where the organic matter content was lower, indaziflam tended to be more percolated, reaching up to 35 cm deep. It was concluded that indaziflam sorption and desorption were influenced by soil attributes, as the organic matter was the main associated factor. In addition, in deeper layers of soil, the sorption was lower, which along with the greater rainfall promoted greater mobility of indaziflam in the Red-Yellow Latosol.

## INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional vem forçando o aumento da produção de alimentos no mundo. Visando evitar perdas na produtividade das culturas, diversas estratégias de manejo são realizadas no campo. Dentre as quais, se destaca o manejo das plantas daninhas, por uso de herbicidas, como prática indispensável para manter boa produtividade (SILVA et al., 2007).

Esses xenobióticos muitas das vezes são utilizados de forma incorreta, seja por negligência ou por falta de conhecimento dos agricultores (OLIVEIRA JR et al., 2011). Esse problema torna-se maior quando os herbicidas aplicados apresentam período residual longo, permanecendo por um maior tempo nos ecossistemas. Por esta razão, estão sujeitos aos diversos processos que ocorrerem no solo, podendo causar contaminação de corpos de águas superficiais e subterrâneas (ROCHA et al., 2013). Além disso, esses herbicidas podem intoxicar culturas sucessoras, inviabilizando dessa forma o cultivo, e ainda favorecer o surgimento de biótipos de plantas daninhas resistentes, devido à pressão de seleção, tornando a ferramenta de controle ineficiente.

Quando os herbicidas são aplicados nos agroecossistemas, eles sofrem uma série de reações e redistribuem-se nos diversos componentes desse ambiente, contaminando-os (BELO et al., 2007). Uma vez aplicado, os herbicidas podem seguir diversos caminhos. Estes podem ser volatilizados, fotodegradados, sofrer escorrimento superficial, serem absorvidos pelas plantas, sofrer degradação ou transformação pela microbiota no solo, serem lixiviados ou adsorvidos aos colóides orgânicos e minerais do solo (PRATA, 2002; MANCUSO et al., 2011). Varias são as características que influenciam no processo de degradação e movimentação de herbicidas. Normalmente são fatores climáticos (temperatura e umidade); edáficos (pH, teor de matéria orgânica, teores de argila e de alumínio, comunidade microbiana, porosidade e estrutura) e do herbicida (pKa, solubilidade, estrutura química do produto,  $K_{ow}$ , tempo de meia vida, etc.) (OLIVEIRA JR et al., 2011).

A dinâmica de um herbicida no solo é muitas vezes citada como dependente do equilíbrio entre os processos de sorção e dessorção, os quais governam a movimentação nos solos, absorção pelas plantas e eficácia do controle das plantas daninhas (ROCHA et al., 2013; LANGARO, 2018). De acordo com OLIVEIRA & BRIGHENTI (2011), conhecer os processos de sorção de um herbicida no solo

permite conhecer a natureza da ligação herbicida-coloide e as forças que atraem e retêm as moléculas do herbicida nesse ambiente.

A sorção refere-se a um processo de retenção de uma determinada substância pelo solo. É um termo utilizado para descrever processos de retenção de moléculas orgânicas sem uma distinção de qual fenômeno está ocorrendo: adsorção, absorção ou precipitação (DAMIN, 2005). Esse processo regula o controle da quantidade da substância presente na solução do solo, como os herbicidas, determinando assim, sua persistência, mobilidade, lixiviação e biodisponibilidade no meio, para ser absorvido pelas plantas (DAMIN, 2005; ARSEGO, 2009).

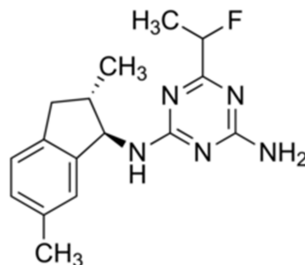
O fenômeno de sorção pode ocorrer sobre a fração orgânica e inorgânica do solo (ARSEGO, 2009). A intensidade e a extensão da sorção dependem dos atributos físicos e químicos do solo, tais como o teor de argila, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e área superficial dos colóides do solo (BURNS et al., 2006, ARSEGO, 2009) e das características do herbicida, tais como solubilidade, capacidade de dissociação eletrolítica (pKa), coeficiente de partição octanol-água (Kow) e pressão de vapor ( $P_V$ ) (SILVA et al., 2007).

Uma vez sorvido aos colóides do solo, o herbicida pode retornar para a solução do solo, processo este denominado dessorção (SILVA et al., 2013). Maiores valores de dessorção, indicam uma sorção fraca, sendo facilmente revertida. Todavia, valores de dessorção baixos indicam uma elevada afinidade do adsorvato (colóides do solo) com o adsorvente (herbicida), geralmente por ligações covalentes e pontes de hidrogênio extremamente fortes (OLIVEIRA Jr, 2011).

O processo de transporte é definido como a movimentação do herbicida no solo, podendo ocorrer por lixiviação, escoamento superficial e volatilização (CHRISTOFFOLETI et al., 2009). Na lixiviação, as moléculas de herbicidas podem ser percoladas no perfil do solo, atingindo camadas profundas, podendo contaminar corpos de águas subterrâneas e superficiais (QUEIROZ et al., 2011). Esse processo de transporte é altamente dependente dos processos de sorção e dessorção, sendo que atuam de forma simultânea. Se um determinado herbicida encontra-se altamente sorvido aos colóides do solo e apresenta uma dessorção baixa, este estará menos sujeito a sofrer o processo de lixiviação (CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Dentre os vários herbicidas utilizados para o controle de plantas daninhas, tem-se 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) (Figura 1). Esse herbicida pertence a uma

nova classe química denominada ‘alkylazine’, onde possui registro no Brasil para usos em varias culturas perenes (MAPA, 2018). É recomendado para aplicação em pré-emergência das plantas daninhas, atuando sobre plantas monocotiledôneas e algumas eudicotiledôneas (AMIM et al., 2014).



**Figura 1** - Estrutura molecular do indaziflam.

O indaziflam possui meia-vida estimada no solo ( $t_{1/2}$ ) maior do que 150 dias, possui baixa solubilidade em água ( $0,0028 \text{ kg m}^{-3}$  a  $20^\circ\text{C}$ ), o  $K_{oc} < 1.000 \text{ mL g}^{-1}$  de carbono orgânico, o  $pK_a = 3,50$  e o  $\log K_{ow}$  em pH 4; 7 ou 9 = 2,80 (TOMPKINS, 2010). Além disso, este é classificado como móvel a moderadamente móvel no solo e apresenta valor de pressão de vapor de  $6,92 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  (GUERRA et al., 2013).

O seu mecanismo de ação está relacionado à inibição da biossíntese de celulose, atuando no complexo celulose sintase, que possui diversas enzimas de celulose sintase (CESA). Estas são um grupo de enzimas responsáveis pela etapa de formação e reticulação das microfibrilas de celulose, fazendo com que novas células da parede celular não sejam formadas, causando inchaço nas raízes, paralisação do crescimento, clorose seguida de necrose com posterior morte da planta (BRABHAM et al., 2014).

Como esse herbicida foi recentemente liberado para uso no Brasil, e com a grande área ocupada pelas culturas para qual é registrado, estima-se um incremento na comercialização e uso, nos próximos anos (BAYER, 2018). Alguns estudos mostram que o seu comportamento é influenciado pelas características dos solos, como pH e teor de matéria orgânica (BRAGA, 2017; GONÇALVES, 2018). Sendo assim, torna-se necessário realizar estudos, visando entender sobre processos de retenção, transformação e transporte em solos tropicais para realizar recomendações seguras do ponto de vista técnico e ambiental, considerando que outros fatores podem influenciar diretamente o seu comportamento no solo, e que a sua dose é dependente da interação entre esses fatores (MAPA, 2018) e não somente o teor de argila, como descrito na bula.

## REFERÊNCIAS

ARSEGO, I. B. **Sorção dos herbicidas diuron e hexazinone em solos de texturas contrastantes**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Piracicaba – SP, 2009.

BELO, A. F.; SANTOS, E. A.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. A.; CECON, P. R.; SILVA, L. L. Effect of soil humidity on *Canavalia ensiformis* and *Stizolobium aterrimum* capacity of remediating soils contaminated by herbicides. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 239-249, 2007.

BURNS, I. G.; HAYES, M. H. B.; STACEY, M. Studies of the adsorption of paraquat on soluble humic fractions by gel filtration and ultrafiltration techniques. **Pesticide Science**, v. 4, n. 5, p. 629-641, 2006.

CHRISTOFFOLETI, P. J., LÓPEZ-OVEJERO, R. F., DAMIN, V., CARVALHO, S. J. P., & NICOLAI, M.. Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, 2009.

DAMIN, V. **Biodegradação, sorção e dessorção do herbicida diuron em dois latossolos tratados com lodo de esgoto**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba,SP, 2005.

KAWAMOTO, K.; URANO, K. Parameters for predicting fate of organochlorine pesticides in the environment (II) Adsorption constant to soil. **Chemosphere**, v. 19, n. 8, p. 1223-1231, 1989.

LANGARO, A. C. **Sorção e lixiviação do Sulfentrazone em Latossolo Vermelho-Amarelo aplicado de forma isolada e em mistura com formulações de Glyphosate**. 2018. 95f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito Residual no solo (“Carryover”). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 2, p. 151- 164, 2011.

MELO, C.A.D.; MEDEIROS, W.N.; TUFFI SANTOS, L.D.; FERREIRA, F.A.; FERREIRA, G.L.; PAES, F.A.S.V.; REIS, M.R. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 28, n. 4, p. 835-842, 2010.

OLIVEIRA JR, R. S., CONSTANTIN, J., & INOUE, M. H. *Biologia e manejo de plantas daninhas*. 2011.

OLIVEIRA JR. R. S., REGITANO J. B. Dinâmica de pesticidas no solo. In: Melo V.F., Alleoni L.R.F. *Química e mineralogia do solo*. Minas Gerais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. p.187-248, 2009.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)**, 2011.

PRATA, F. **Comportamento do glifosato no solo e deslocamento miscível de atrazina**. Piracicaba, 2002. 149 p. (Tese Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

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 desorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 31, p. 231-238, 2013.

SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, VIVIAN R.; OLIVEIRA Jr. R. S. Herbicidas: Comportamento no solo. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, v. 2, p. 58-117, 2007.

SILVA, G. R., D'ANTONINO, L., FAUSTINO, L. A., SILVA, A. A., FERREIRA, F. A., & TEXEIRA, C. C. Sorption of fomesafen in Brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 31, n. 4, p. 971-977, 2013.

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.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS PARA DEFESA VEGETAL (SINDIVEG). **Setor de defensivos agrícolas registra queda de vendas**, 2017. Acesso em 29/05/2018 Link: <http://sindiveg.org.br/estatisticas-do-setor/>

QUEIROZ, G. M. P., SILVA, M. D., BIANCO, R. J. F., PINHEIRO, A., & KAUFMANN, V. Transporte de glifosato pelo escoamento superficial e por lixiviação em um solo agrícola. **Química Nova**, v. 34, n. 2, p. 190-195, 2011.

(MAPA)-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, AGROFIT (2003). Link: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons) Acessado em 16/05/2018.

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.

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.

TOMPKINS, J. 2010. **Pesticide Fact Sheet: Indaziflam**. Environmental Protection Agency. Unites States. Disponível em: <[http://www.epa.gov/opp00001/chem\\_search/reg\\_actions/registration/fs\\_PC-80818\\_26-Jul-10.pdf](http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-80818_26-Jul-10.pdf)> Acessado em: 25 de abril de 2018.

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.

BAYER ENVIRONMENTAL SCIENCE. **Specticle herbicide technical bulletin**; 2018; 19 pp.

## **ATRIBUTOS DOS SOLOS NA SORÇÃO E DESSORÇÃO DO INDAZIFLAM**

**Resumo:** O indaziflam é um herbicida inibidor da biossíntese de celulose, que controla plantas daninhas monocotiledôneas e algumas eudicotiledôneas. Contudo, estudos da dinâmica do indaziflam em solos tropicais são ainda incipientes. Sendo assim, torna-se necessário entender o comportamento desse produto nos solos, visando recomendações seguras e eficientes do ponto de vista técnico e ambiental. Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar a sorção e dessorção do indaziflam em 12 amostras de solos de diferentes regiões do país, buscando evidenciar quais atributos do solo influenciou diretamente no comportamento desse herbicida. A sorção e a dessorção foram determinadas utilizando-se o método “batch equilibrium” e cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). A partir dos valores dos coeficientes de sorção ( $K_f$ ), coeficientes de dessorção ( $K_{fd}$ ) e índice de histerese ( $H$ ), procedeu-se uma análise de correlação de Pearson entre esses índices e os atributos do solo, sendo comparados os valores pelo teste “t” a 5% de probabilidade. Os valores de  $K_f$  determinados nesses estudos foram classificados como baixos, com um valor máximo de 24,84 no Gleissolo (GX), uma vez que esse solo apresentou o maior teor de matéria orgânica e menor valor de pH. Os valores de  $K_{fd}$  correlacionaram-se positivamente com o  $K_f$ . Nos solos com maior sorção a dessorção também foi maior. Houve correlação significativa entre o teor de matéria orgânica dos solos e a sorção do indaziflam, mostrando que esse atributo exerceu influência sobre a dinâmica deste herbicida no solo. Concluiu-se que a matéria orgânica foi o fator que mais influenciou a sorção do indaziflam nos solos estudados, dada a sua maior correlação. O pH exerceu maior influência sobre o processo de sorção em solos com menores teores de matéria orgânica. O processo de dessorção foi favorecido no equilíbrio sorção-dessorção para o indaziflam nos solos.

**Palavras-chaves:** Matéria orgânica, CTC, adsorção.

## SOIL ATTRIBUTES ON THE INDAZIFLAM SORPTION AND DESORPTION.

**Abstract:** Indaziflam is an herbicide inhibitor of cellulose biosynthesis, which controls monocotyledonous weeds and some eudicots. However, studies of its dynamics in tropical soils are still incipient. Therefore, it is necessary to understand the behavior of this herbicide in soils, aiming at safe and efficient recommendations from a technical and environmental point of view. The objective of this study was to evaluate the sorption and desorption of indaziflam in 12 soil samples from different regions of the country, aiming to relate which soil attributes directly influenced the behavior of this herbicide. Sorption and desorption were determined using the batch equilibrium method and high performance liquid chromatography (HPLC). From the values of sorption coefficients ( $K_f_s$ ), desorption coefficients ( $K_f_d$ ) and hysteresis index (H), a Pearson correlation analysis was performed between these indices and the soil attributes. Such values were compared by the "T" test at 5% probability. Values of  $K_f_s$  were classified as low, with a maximum value of 24.84 in the Gleissolo (GX), since this soil presented the highest content of organic matter and lower pH.  $K_f_d$  values correlated positively with  $K_f_s$ . In soils with higher sorption, the desorption was also higher. There was a significant correlation between soil organic matter content and indaziflam sorption, showing that this attribute influenced the dynamics of this herbicide in the soil. It was concluded that organic matter was the factor that most influenced indaziflam sorption in the studied soils, given its greater correlation. The pH exerted greater influence on the sorption process in soils with lower organic matter content. The desorption process was favored in the sorption-desorption equilibrium for the indaziflam in the soils.

**Keywords:** Organic matter, CTC, adsorption.

## INTRODUÇÃO

A utilização indiscriminada de herbicidas e a falta de conhecimento das interações desses compostos com o ambiente pode provocar contaminação de recursos naturais, principalmente o solo e mananciais hídricos (VIVIAN et al., 2007). Frequentemente, vem sendo detectada a presença de agrotóxicos, sobretudo de herbicidas, em corpos de água, podendo inviabilizar o consumo humano e animal (KAMATA et al., 2018; HERNANDEZ et al., 2017).

Quando em contato com o solo, os herbicidas sofrem influência de agentes físicos, químicos e biológicos, onde os mesmos podem ser retidos pela fração orgânica e mineral do solo, sofrer degradação química e/ou biológica, serem absorvidos pelas plantas, volatilizados ou lixiviados para camadas mais profundas do solo (LAW, 2001; ROCHA et al., 2013). Esses processos são influenciados pelas propriedades físicas e químicas dos solos (pH, matéria orgânica, textura, CTC, etc.), do herbicida (constante de dissociação ácida, solubilidade em água, constante de partição octanol-água, tempo de meia vida, etc.), além das condições climáticas (temperatura, precipitação pluviométrica, umidade e radiação) (SILVA et al., 2013; LANGARO, 2018).

A sorção e a dessorção de herbicidas são importantes parâmetros que podem ser utilizados para entender a dinâmica desses compostos no solo, avaliando o potencial de contaminação do produto ao ambiente (SILVA et al., 2012). A sorção é denominada como um processo geral, que compreende a adsorção, absorção e precipitação, visto que a separação destes três eventos é de difícil mensuração (VIVIAN et al., 2007). O processo de sorção é caracterizado, como a atração e retenção de moléculas e íons a superfície de sólidos (SILVA et al., 2012). A dessorção está relacionada ao retorno da molécula anteriormente sorvida para os colóides do solo (ROCHA et al., 2013). Tal fato determina a intensidade de resposta quanto à liberação de herbicidas na solução, estando diretamente ligada ao potencial de mobilidade da molécula no perfil do solo (PETTER et al., 2016).

Estes processos exercem influência sobre a mobilidade e persistência do herbicida no solo e também, a disponibilidade na solução do solo para absorção pelas plantas, influenciando na eficiência agrônômica. Assim são considerados por muitos autores como fatores chave da regulação dos possíveis caminhos que uma molécula de herbicida segue no ambiente (MOURE et al., 2009; ALONSO et al., 2015).

Embora haja demanda pela introdução de novas moléculas, com efeito herbicida, poucas moléculas têm sido introduzidas no mercado nos últimos anos (GUERRA et al., 2013). Dentre os novos ingredientes ativos disponibilizados no mercado, destaca-se o indaziflam, cujo mecanismo de ação está relacionado à inibição da biossíntese de celulose, fazendo com que novas células da parede celular não sejam formadas, resultando na paralisação do desenvolvimento da planta (BRABHAM et al., 2014).

Este herbicida controla espécies de plantas monocotiledôneas e algumas eudicotiledôneas, com eficiência acima de 95% (AMIM et al., 2014), mediante aplicação em pré-emergência. O indaziflam possui meia-vida estimada no solo ( $t_{1/2}$ ) maior do que 150 dias, possui baixa solubilidade em água ( $0,0028 \text{ kg m}^{-3}$  a  $20^\circ\text{C}$ ), o  $K_{oc} < 1.000 \text{ mL g}^{-1}$  de carbono orgânico, o  $pK_a = 3,50$  e o  $\log K_{ow}$  em pH 4; 7 ou 9 = 2,80 (TOMPKINS, 2010). Além disso, este é classificado como móvel a moderadamente móvel no solo e apresenta valor de pressão de vapor de  $6,92 \times 10^{-8}$  Pa (GUERRA et al., 2013).

O Brasil possui solos com diferentes características físicas, químicas e biológicas, devido a sua grande extensão territorial e também variadas condições climáticas nas regiões que afetam a formação dos solos (MELFI & PEDRO, 2017). Diante disso, torna-se necessário entender a dinâmica do indaziflam no ambiente, a relação entre os atributos do solo e sua influência sobre aspectos relacionados à retenção no solo, potencial de lixiviação e persistência.

Diante do exposto, objetivou-se com esta pesquisa avaliar a sorção e dessorção do indaziflam em 12 solos tropicais coletados em diferentes regiões brasileiras, com características físicas e químicas distintas.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Herbicida no Solo, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Foram avaliadas amostras de solos de diferentes classes, coletadas em 12 localidades do Brasil (Tabela 1).

**Tabela 1-** Solos coletados em diferentes regiões do Brasil..

Municípios	Coordenadas	Classes
Viçosa-MG	20°44'49.7"S 42°50'33.5"W	Latossolo-Vermelho-Amarelo (LVA <sub>1</sub> )
Três Marias-MG	18°10'24.4"S 45°13'43.6"W	Latossolo-Vermelho-Amarelo distrófico(LVAd)
Linhares-ES	19°19'05.3"S 40°02'38.1"W	Latossolo Amarelo (LA)
Mandaguaçu-PR	23°20'49.7"S 52°01'00.9"W	Latossolo Vermelho eutroférico (LVef)
Maringá-PR	23°21'36.6"S 52°03'07.4"W	Nitossolo Vermelho (NV)
Redenção-PA	8°08'59.5"S 50°14'30.9"W	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)
Urutaí-GO	17°29'32.7"S 48°12'51.5"W	Latossolo Vermelho (LV)
Jundiaí-SP	23°07'30.2"S 46°55'12.0"W	Argissolo Vermelho (PV)
Barreiras-BA	12°10'59.8"S 45°10'39.0"W	Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA <sub>2</sub> )
Aratiba- RS	27°26'23.8"S 52°14'39.6"W	Latossolo Vermelho-Escuro álico (LVEa)
Maceió-AL	9°30'25" S 35°39'25" W	Gleissolo (GX)
Maceió-AL	9°39'21" S 35°44'38"W	Latossolo Vermelho Amarelo (LVA <sub>3</sub> )

As amostras dos solos foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, em locais sem histórico de aplicação de herbicidas, estas foram destorroadas, secas à sombra e peneiradas em peneira com malha de 4 mm. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas, onde se procedeu a coleta de subamostras de cada solo para caracterização das propriedades físicas e químicas que estão apresentadas na Tabela 2, conforme a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (1997).

**Tabela 2 - Resultados das análises físicas e químicas dos solos.**

Análise física														
Solo	Areia		Silte		Argila		Classe textural							
	(Dag Kg <sup>-1</sup> )													
LVA <sub>1</sub> - Viçosa-MG	38		8		54		Argiloso							
LVA <sub>d</sub> - Três Marias-MG	79		2		19		Franco-arenoso							
LA - Linhares-ES	74		4		22		Franco-argilo-arenoso							
LVE <sub>f</sub> - Mandaguaçu-PR	24,6		14,6		60,8		Argiloso							
NV - Maringá-PR	75,2		4,8		20		Franco-arenoso							
PVA <sub>d</sub> - Redenção-PA	38		6		56		Argiloso							
LV - Urutaí-GO	60		3		38		Argilo-arenoso							
PV - Jundiá-SP	45		25		30		Franco-argiloso							
LVA <sub>2</sub> - Barreiras-BA	15		42		43		Argilo-siltoso							
LVE <sub>a</sub> - Aratiba- RS	22		32		46		Argilo-siltoso							
GX - Maceió-AL	50		28		22		Franco-siltoso							
LVA <sub>3</sub> - Maceió-AL	63		11		26		Franco argilo-arenoso							
Análise química														
Solo	pH	P	K	Ca	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem
	(H <sub>2</sub> O)-	-(mg dm <sup>-3</sup> )-		----- (Cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )-----						--- (%) ---	-(dag kg <sup>-1</sup> )-	(mg L <sup>-1</sup> )-		
LVA <sub>1</sub> - Viçosa-MG	5,5	14,1	157	1,9	0,9	0,1	5,1	3,2	3,3	8,3	39	3	3,5	21,01
LVA <sub>d</sub> -Três Marias-MG	4,36	1	15	0,42	0,03	0,5	3,5	0,49	0,99	3,99	12,3	50,5	1,01	32,4
LA - Linhares-ES	5,77	6,8	67	3,17	0,97	0,1	2	4,31	4,41	6,31	68,3	2,3	1,52	42,8
LVE <sub>f</sub> - Mandaguaçu-PR	5,6	7	0,43	3,6	1,2	0	3,1	5,23	5,23	8,33	62,79	0	3,6	30,8
NV - Maringá-PR	6	39	0,24	1,6	0,7	0	1,6	2,54	2,54	4,14	61,35	0	1,5	15,2
PVA <sub>d</sub> - Redenção-PA	6,37	0,8	72	2,2	0,41	0	1,9	2,79	2,79	4,69	59,5	0	1,48	9,3
LV - Urutaí-GO	5	9,9	431	1,1	0,47	0,09	4,7	2,68	2,77	7,38	36,3	3,2	3,63	24,3
PV - Jundiá-SP	4,99	79,3	29	5,12	0,95	0	3,9	6,14	6,14	10,04	61,2	0	2,82	38,1
LVA <sub>2</sub> - Barreiras-BA	4,59	49	165	3,49	1,16	0,94	10,1	5,07	5,07	15,17	33,4	15,6	2,02	17,5
LVE <sub>a</sub> - Aratiba- RS	6,54	16,3	362	5,86	1,36	0	1,1	8,15	8,15	9,25	88,1	0	3,76	33,6
GX - Maceió-AL	4,15	35,63	180	2,89	0,70	0,30	9,08	4,05	4,35	13,71	34,00	6,00	3,80	28,02
LVA <sub>3</sub> - Maceió-AL	5,84	0,91	44,07	1,37	1,77	0,00	5,45	3,25	3,25	9,17	41,00	0,00	1,77	32,23

V: saturação de bases, SB- soma de bases; T: CTC total, t: CTC efetiva; MO: matéria orgânica, P-rem: Fosforo remanescente, pH: potencial hidrogenionico, m: saturação por alumínio.

\*Análises realizadas segundo a metodologia da Empresa de Brasileira de Pesquisa e Agropecuária - Embrapa, 1997.

## Tempo de equilíbrio

Primeiramente foi determinado o tempo necessário para o equilíbrio da sorção do herbicida em solo, empregando-se o método “batch equilibrium” segundo recomendações e normas da OECD (2000). Utilizou-se solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , contendo  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$  de indaziflam obtida a partir de uma solução estoque de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ , preparada de um padrão com 99,9% de pureza. O experimento foi realizado em triplicata, onde foram adicionadas 10,00 mL da solução em tubos de polipropileno, com capacidade de 50,00 mL, contendo 2,000 g dos solos em seus respectivos tratamentos. Em seguida as amostras foram submetidas à agitação vertical (40 rpm) em diferentes tempos (2,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0; 24,0 e 32,0 horas) em temperatura ambiente ( $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Após a agitação, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm, durante seis minutos. Posteriormente, parte do sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro Millipore com membrana PTFE de  $0,45 \mu\text{m}$ , diretamente para “vials” com capacidade 1,50 mL, para posterior análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE). Foi considerado como tempo de equilíbrio, o tempo no qual a concentração da solução analisada permaneceu constante.

## Sorção

Para analisar a sorção do indaziflam foram preparadas soluções de trabalho do herbicida a partir da mesma solução estoque ( $1000 \text{ mg L}^{-1}$ ), nas concentrações de: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e  $3,0 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ . Adicionou-se 10,00 mL dessas soluções em tubos de polipropileno contendo 2,00 g de solo, onde estes foram agitados no tempo de equilíbrio (12 h) estimado anteriormente para cada solo. Após agitação, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm, por sete minutos e o sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro millipore com membrana PTFE de  $0,45 \mu\text{m}$ , diretamente para “vials” de 1,50 mL, para posterior análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE).

A quantidade de herbicida sorvido ao solo ( $C_s$ ) em  $\text{mg kg}^{-1}$  foi calculada a partir da diferença entre a quantidade de herbicidas inicialmente adicionada ao solo ( $C_p$ ) em  $\text{mg L}^{-1}$  e a quantidade encontrada na solução de equilíbrio ( $C_e$ ) em  $\text{mg L}^{-1}$ . De posse dos valores de  $C_e$  e de  $C_s$ , foi ajustada a equação de Freundlich ( $C_s = K_f C_e^{1/n}$ ) para obtenção dos coeficientes de sorção ( $K_f$ ) e interpretação dos resultados.

## Dessorção

O estudo da dessorção foi realizado logo após o ensaio de sorção, onde 10,00 mL da solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$ , isento de herbicida, foi adicionada aos tubos de polipropileno anteriormente utilizados na sorção. Os solos foram ressuspensos em um agitador vortex por 2 min, sendo novamente submetidos à agitação vertical pelo mesmo tempo em que foram realizados os ensaios de sorção. Após agitação, as amostras foram novamente centrifugadas a 3.000 rpm, por seis minutos. Em seguida parte do sobrenadante foi filtrada em filtro millipore com membrana PTFE de 0,45  $\mu\text{m}$ , para posterior análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE).

As concentrações do herbicida dessorvidos ao solo ( $C_d$ ) em  $\text{mg kg}^{-1}$  foi calculada por diferença entre a quantidade sorvida ao solo em  $\text{mg kg}^{-1}$  e a quantidade que retornou para a solução de equilíbrio ( $C_e$ ) em  $\text{mg L}^{-1}$ . De posse do novo  $C_s$  e valores de  $C_e$ , ajustou-se a equação de Freundlich ( $C_s = K_f C_e^{1/n}$ ) para obtenção dos coeficientes de dessorção ( $K_{fd}$ ) e interpretação dos resultados. Também foi calculado o índice de histerese (H), dividindo-se o (1/n) da sorção pelo (1/n) da dessorção.

Em posse dos valores de  $K_{fs}$ ,  $K_{fd}$  e H, foi utilizada a Correlação de Pearson utilizando o programa SAS, versão 9.4, para medir o grau de associação linear entre esses coeficientes com atributos dos solos, dentro dos grupos e de forma abrangente, com todos os solos. Foram utilizados na análise de correlação o teor de matéria orgânica (MO), CTC total (T), CTC efetiva (t), fósforo remanescente (P-rem), acidez potencial (H+Al), Soma de bases (SB), teor de argila, teor de silte, teor de areia e pH

## HPLC

A quantificação do indaziflam foi realizada em sistema de cromatografia líquida de alta eficiência. O equipamento utilizado foi um cromatógrafo modelo Shimadzu LC 20AT, com detector 43 DAD (Shimadzu SPD 20AT) e coluna  $\text{C}_{18}$  de aço inox (Shimadzu VP- ODS Shim-pack 250 mm x 4,6 mm d. i. x 5  $\mu\text{m}$  diâmetro de partículas). As condições cromatográficas foram compostas pela fase móvel de acetonitrila: água (acidificada com 0,01% de ácido acético) a uma proporção de 60:40, fluxo de 1,0  $\text{mL min}^{-1}$ , volume de injeção de 20  $\mu\text{L}$ , comprimento de onda de 210 nm e temperatura de 30 °C. Nessas condições cromatográficas, o tempo de retenção para o indaziflam foi de aproximadamente 7 minutos.

O método para determinação da sorção e dessorção foi validado segundo os parâmetros de desempenho analítico, propostos pelo Inmetro (2010) e Anvisa (2003). A linearidade foi determinada utilizando sete concentrações em triplicata 0,50 a 10,00 mg L<sup>-1</sup> em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>. A seletividade foi avaliada analisando os sobrenadantes resultantes da agitação do solo com 10,00 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> isenta e com a presença de indaziflam.

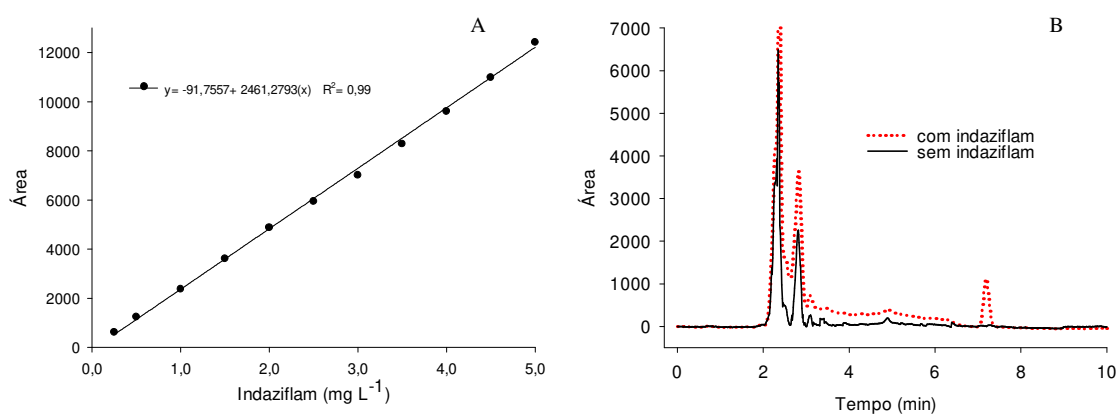
### **Análises estatísticas**

Foi utilizada a isoterma de Freundlich para descrever a sorção e dessorção do indaziflam nos solos, sendo obtidas as curvas por meio do programa Sigmaplot versão 12,6. Devido ao número elevado de solos avaliados, estes foram divididos em dois grupos, visando facilitar a visualização das curvas, mantendo-se os gráficos em mesma escala, para permitir a comparação entre eles. O primeiro consistiu dos solos com valores de pH menores que 5,0 e o segundo dos solos com valores de pH maiores que 5,5.

Em posse dos valores dos Kf e índice de histerese foi realizada análise de correlação de Pearson, entre esses coeficientes e os principais atributos dos solos, considerando todos os solos e posteriormente para os dois grupos de pH. Com intuito de verificar se os coeficientes de correlações foram significativos, foi realizado o teste “t” de Student a 5% de probabilidade. Para as análises (correlação e teste “t”), foi utilizado o programa estatístico SAS versão 9,1.

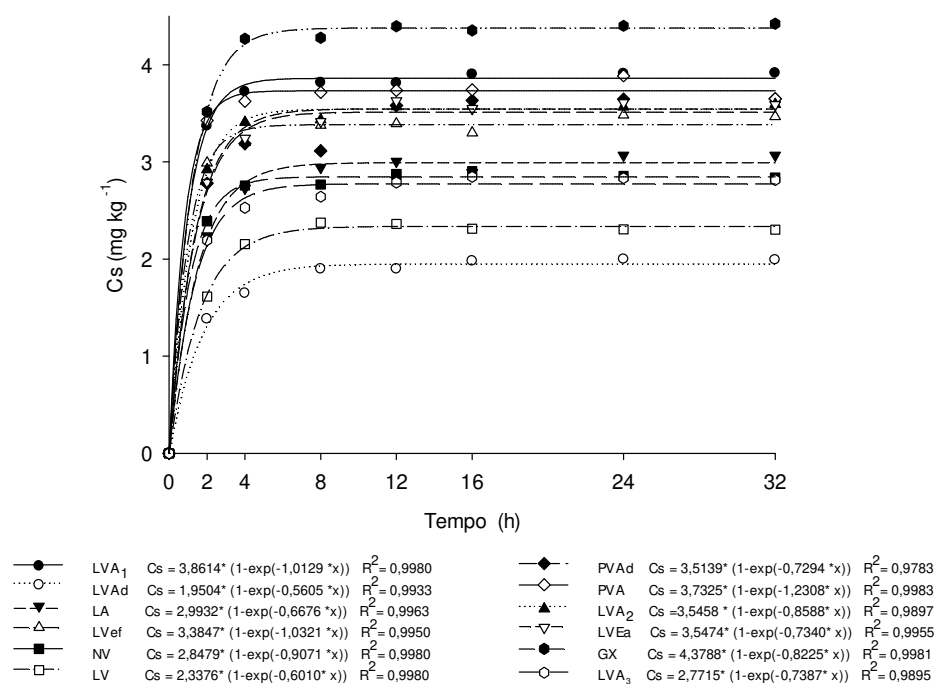
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A linearidade do método é a capacidade do equipamento fornecer valores respostas proporcionais ao aumento da concentração do analito em questão. Essa foi determinada injetando-se amostras do indaziflam em diferentes concentrações, usando como solvente a acetonitrila. O aumento da concentração do herbicida proporcionou um aumento linear nas áreas obtidas nos cromatogramas, sendo o  $R^2$  de 0,99 (Figura 1A). Já a seletividade é demonstrada na Figura 1B, onde se observa a existência de dois cromatogramas, para o Argissolo de Jundiaí-SP (PV). O primeiro cromatograma corresponde ao solo isento de fortificação com herbicida e o segundo o solo fortificado com  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de indaziflam, onde, aproximadamente aos 7 minutos de tempo de corrida observa-se o pico do herbicida (Figura 1B).



**Figura 1** - Linearidade (A) e seletividade (B) do método de quantificação do indaziflam.

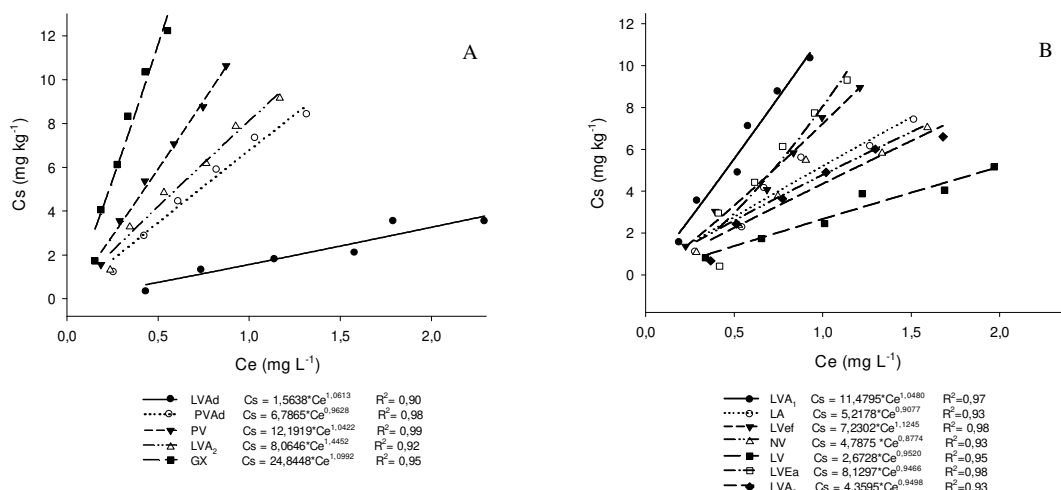
A cinética de sorção se caracterizou por duas fases distintas para todos os solos (Figura 1). A primeira, com sorção rápida, devido aos sítios de adsorção dos solos estarem amplamente disponíveis para ocupação pelas moléculas do indaziflam e a segunda caracterizou-se por sorção lenta, devido aos sítios já estarem ocupados pelas moléculas do herbicida, ocorrendo repulsão destas e diminuindo o potencial sortivo (LIU et al.,2010). Segundo ALONSO et al. (2015), a sorção mais rápida na primeira fase, se deve também as ligações das moléculas aos sítios externos, nos quais o processo ocorre rapidamente e, na segunda fase, as ligações ocorrem nos sítios internos, que são menos acessíveis, retardando o equilíbrio.



**Figura 2** - Estimativa da cinética de sorção do indaziflam em solos com diferentes atributos. GX: Gleissolo; LVAAd; Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>2</sub>: Latossolo Vermelho-amarelo; PV: Argissolo Vermelho; PVAAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>1</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; LVef: Latossolo vermelho eutroférico; LA: Latossolo Amarelo; LVA<sub>3</sub>; Latossolo Vermelho-Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; LV: Latossolo vermelho; LVEa: Latossolo Vermelho-Escuro álico.

O tempo de equilíbrio para todos os solos foi de oito horas, sendo adotado para posteriores avaliações o tempo de 12 horas, para maior uniformidade dos dados (Figura 2).

A isoterma de Freundlich adequou-se satisfatoriamente para descrever a sorção do indaziflam em todos os solos, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ), maiores que 0,90 (Figuras 3A e 3B). Como comentado anteriormente, os solos foram divididos em dois grupos, com valor de pH igual ou menor que 5,0 (Figura 3A) e maiores que 5,0 (Figura 3B).



**Figura 3** - Isotermas de sorção do indaziflam em solos com valores de pH menores que 5,0 (A) e solos com valores de pH maiores que 5,5 (B).

GX: Gleissolo; LVAd; Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>2</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>1</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; LVef: Latossolo vermelho eutroférico; LA: Latossolo Amarelo; LVA<sub>3</sub>; Latossolo Vermelho-Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; LV: Latossolo vermelho; LVEa: Latossolo Vermelho-Escuro álico.

O Gleissolo (GX) de Maceió-AL destacou-se em relação aos demais solos, quanto ao coeficiente de sorção de Freundlich ( $K_f$ ), com o maior valor obtido (24,84), sendo este bem superior aos demais (Figuras 3A e 3B e Tabela 3). Este solo caracteriza-se pela combinação entre o menor valor de pH (4,15) associado ao maior teor de matéria orgânica (3,80), dentre todos os solos, e elevada CTC (13,71) (Tabela 1). Por outro lado, o menor valor de  $K_f$  foi observado no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) de Três Marias-MG (1,01), que possui o mais baixo teor de matéria orgânica e a menor CTC (3,99). Entretanto, este solo possui pH baixo (4,36), que indica que apesar da influência do pH na sorção do indaziflam (GONÇALVES, 2018), atributos como teor de matéria orgânica e CTC são os fatores que mais regulam a retenção desse herbicida no solo. ROCHA et al. (2013) relatou que a elevação do pH em solos com maior capacidade sortiva, não influenciaram nos valores de  $K_f$  na sorção do diuron. Esses mesmos autores, atribuíram esse fato ao poder-tampão, promovido pelo maior teor de argila e matéria orgânica nos solos, onde o sistema torna-se mais resistente a variação no valor do pH.

**Tabela 3** - Coeficientes de sorção ( $Kf_s$ ), dessorção ( $Kf_d$ ),  $1/n$  da sorção ( $1/n_s$ ),  $1/n$  da dessorção ( $1/n_d$ ) e índice de histerese (H) para os diferentes solos.

Classes	$Kf_s$	$1/n_s$	$Kf_d$	$1/n_d$	H
GX	24,8448	1,0992	74,1592	1,6294	0,6746
LVAd	1,5638	1,0613	11,1182	2,5045	0,4237
LVA <sub>2</sub>	8,0646	1,4452	25,3638	1,7089	0,8456
PV	12,1919	1,0422	22,7845	1,4923	0,6983
PVAd	6,7825	0,9628	18,2088	1,5364	0,6266
LVA <sub>1</sub>	11,4795	1,048	26,4698	1,3592	0,7710
LVef	7,2302	1,1245	25,308	1,7927	0,6272
LA	5,2178	0,9077	13,9505	1,5804	0,5743
LVA <sub>3</sub>	4,3595	0,9498	10,2748	1,4755	0,6437
NV	4,7875	0,8774	11,8192	1,4813	0,5923
LV	2,6745	0,952	6,6056	1,778	0,5354
LVEa	8,1297	0,9466	26,5555	1,8924	0,5002

GX: Gleissolo; LVAd; Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>2</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>1</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; LVef: Latossolo vermelho eutroférico; LA: Latossolo Amarelo; LVA<sub>3</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; LV: Latossolo vermelho; LVEa: Latossolo Vermelho-Escuro álico.

Na Tabela 4 estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson dos atributos dos solos em relação ao coeficiente de sorção do indaziflam, onde os maiores índices de correlação com o  $Kf_s$  foram observados para CTC (0,69) e para teor de matéria orgânica (0,66), enquanto que a correlação com o pH foi de -0,48. (Tabela 4). Valores dos coeficientes de correlação varia de 1 a -1, sendo que valores positivos indicam relação direta entre o aumento da sorção com o aumento do atributo do solo e valores negativos indicam relação inversa, onde o aumento do valor do atributo do solo, promove decréscimos na sorção (CECON et al., 2012). Estes índices foram considerados baixos, o que se deve, provavelmente, às características contrastantes para um mesmo solo, como, por exemplo, elevado valor de pH que desfavorece a sorção e elevado teor de matéria orgânica que favorece a sorção. Como ocorre no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) de Redenção-PA, ou baixo valor de pH e baixo teor de matéria orgânica, que favorecem e desfavorecem a sorção respectivamente, como ocorre no solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) de Três Marias-MG.

**Tabela 4** - Correlação de Pearson entre o coeficiente de sorção (Kfs), dessorção (Kfd) e histerese (H) com os atributos dos doze solos estudados.

	pH	t	T	SB	MO	Areia	Silte	Argila	P-rem	H	Kfd
	H <sub>2</sub> O	-----Cmolc dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----			mg L <sup>-1</sup>		
Kfs	-0,48	0,34	0,69*	0,21	0,66	-0,25	0,51	-0,09	0,12	0,46	0,96*
Kfd	-0,52	0,28	0,68	0,25	0,64	-0,27	0,53	-0,08	0,10	0,34	-
H	-0,31	0,23	0,73*	0,15	0,33	-0,47	0,50	0,23	-0,22	-	-

\*Significativo ao teste “t” a 5% de probabilidade.

Com a separação dos solos em relação aos valores de pH, verificou-se aumento da correlação entre a sorção e o teor de matéria orgânica nos dois grupos de solos, com valores de 0,72 e 0,84, nos solos com  $\text{pH} \leq 5,0$  e  $\text{pH} \geq 5,5$ , respectivamente (Tabela 5). Apesar da boa correlação obtida no solo com  $\text{pH} \leq 5,0$ , em solos com pH acima de 5,5 observou-se que a matéria orgânica possivelmente, foi a principal característica envolvida os processos de retenção do indaziflam. Tal fato pode ser comprovado no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) de Viçosa, que com pH 5,5, obteve o terceiro maior valor de Kfs (11,47), devido ao elevado teor de matéria orgânica (3,5 dag kg<sup>-1</sup>). Por outro lado, no Argissolo Vermelho (PV) de Jundiaí, foi observado o segundo maior Kfs (12,19) (Tabela 3). O valor de Kfs observado neste solo pode estar atrelado ao pH relativamente baixo (4,99) associado ao teor de matéria orgânica relativamente alto (2,82 dag kg<sup>-1</sup>) (Tabela 2).

**Tabela 5** - Correlação de Pearson entre o coeficiente de sorção (Kfs), dessorção (Kfd) e histerese (H) com os atributos dos solos de acordo com os valores de pH.

( pH ≤ 5,0)											
	pH	t	T	SB	MO	Areia	Silte	Argila	P-rem	H	Kfd
	H <sub>2</sub> O	-----Cmolc dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----			mg L <sup>-1</sup>		
Kfs	-0,39	0,58	0,65	0,19	0,72	-0,27	0,49	-0,22	0,06	0,39	0,95*
Kfd	-0,60	0,39	0,62	0,06	0,62	-0,20	0,44	-0,29	-0,08	0,29	-
H	0,22	0,84	0,91	0,97	0,37	-0,97*	0,88	0,75	-0,52	-	-
( pH ≥ 5,5)											
	pH	t	T	SB	MO	Areia	Silte	Argila	P-rem	H	Kfd
	H <sub>2</sub> O	-----Cmolc dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----			mg L <sup>-1</sup>		
Kfs	-0,41	0,21	0,57	0,36	0,84*	-0,46	0,36	0,40	0,19	0,59	0,91*
Kfd	-0,24	0,36	0,65	0,65	0,96*	-0,65	0,61	0,50	0,33	0,30	-
H	-0,85*	-0,36	0,28	-0,46	0,26	0,06	-0,38	0,14	-0,08	-	-

\*Significativo ao teste “t” a 5% de probabilidade.

Ressalte-se que, apesar de as correlações entre o K<sub>f</sub>s e a matéria orgânica nos solos com pH  $\leq 5,0$  e da CTC (T) nos dois grupos de solos não serem significativas pelo teste “t” a 5%, estas são consideradas correlações fortes. Segundo DANCEY e REIDY (2013), coeficientes de correlações de 0,40 a 0,60 são considerados moderados, enquanto que valores de 0,70 a 1,00 evidenciam correlações fortes.

Resultados obtidos por Braga (2017) e Gonçalves (2018) associam o aumento da sorção do indaziflam a solos com maiores teores de matéria orgânica e menores valores de pH, sendo o pH próximo ao pK<sub>a</sub> do herbicida.

O indaziflam possui pK<sub>a</sub> de 3,5, sendo considerado um herbicida derivado de um ácido fraco, com capacidade de doar prótons, ficando em sua forma aniônica, quando dissociado (ALONSO et al., 2011). Em solos com valores de pH próximos ao do pK<sub>a</sub>, o herbicida estará em maior concentração em sua forma molecular, estando sujeito a maior sorção. No entanto, em valores de pH maiores que o de pK<sub>a</sub>, estes tendem a estar em maior concentração em sua forma aniônica, sendo dessa maneira, repellido pelas cargas negativas dos solos, permanecendo na solução do solo, estando mais sujeito à lixiviação (SILVA et al., 2013).

A matéria orgânica possui sítios tridimensionais de ligações, onde os herbicidas se ligam de forma complexa, por meio de ligações hidrogênio, ligações covalentes e interações hidrofóbicas (BENOIT et al., 2008). Nos herbicidas poucos solúveis em água e lipofílicos, como o indaziflam, as interações hidrofóbicas com a matéria orgânica são consideradas as mais importantes (SILVA et al., 2007). ALONSO et al. (2011) observaram correlação significativa entre o teor de matéria orgânica e a sorção do indaziflam em solos brasileiros. Todavia, estes autores não observaram correlação significativa entre a sorção e o pH do solo, corroborando com o presente trabalho.

Outro atributo que se manteve com boa correlação com a sorção, mesmo após o agrupamento dos solos, foi a CTC (T) que corresponde à soma dos cátions que efetivamente podem ser trocados no complexo de cargas com os hidrogênios e alumínio, demonstrando a capacidade do solo em reter os herbicidas (LOPES & ALVAREZ, 1999). ROCHA et al. (2013) constataram relação direta da CTC com a sorção do diuron em solos tropicais, onde solos com maiores valores de CTC apresentaram maior sorção.

A matéria orgânica está interligada aos valores de CTC nos solos, haja vista que com o aumento do seu teor ocorre aumento de sítios de cargas negativas no solo,

contribuindo para elevação dos sítios de troca de cátions, com maior efeito em solos arenosos (PAES et al., 1996). Nas condições tropicais, ocorre predomínio de óxidos de Fe e Al e argilas silicatadas 1:1 de baixa atividade, sobretudo as caulinitas, sendo assim a matéria orgânica torna-se o fator principal de constituição da CTC nesses solos (PROCOPIO et al., 2001). PASSOS (2015) avaliando a sorção do picloran em 12 solos observou correlação positiva de 97%, entre o teor de matéria orgânica e CTC total, Além disso, essa mesma autora, observou correlação significativa entre o teor de matéria orgânica e a CTC dos solos, com o coeficiente de sorção (Kf) do picloran.

Todos os valores de Kfs determinados neste trabalho foram classificados como baixos evidenciando a baixa sorção do indaziflam nos solos tropicais. Este fato pode ser explicado por ser um ácido fraco. Herbicidas com dissociação em ânions apresentam intensidade de sorção baixa, como o picloram (ASSIS et al., 2011). Por outro lado, herbicidas catiônicos, são altamente sorvidos aos solos, pois, são atraídos aos sítios de trocas, como cátions trocáveis. MARTINS et al. (2018) observou elevada sorção do atrazine em solos, devido a seu caráter de base fraca, ou seja, quando dissociado adquire carga positiva, sendo atraído aos sítios dos coloides do solo e retido com maior intensidade.

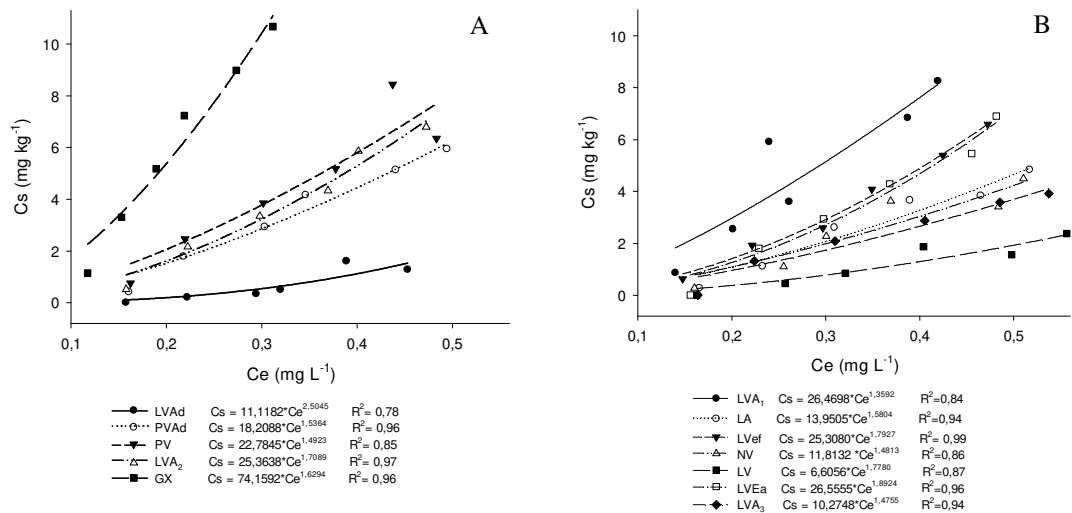
A sorção do herbicida ao solo é interessante para evitar a lixiviação do herbicida e consequente contaminação ambiental, no entanto, uma vez sorvido em elevada intensidade, este pode não retornar a solução do solo, não exercendo o controle das plantas daninhas, perdendo eficiência agrônômica (BRAGA, 2015).

O parâmetro  $1/n$ , fator que determina a linearização e a intensidade da sorção do herbicida (Silva et al., 2013), variou de 0,8774 a 1,4452. Valores de  $1/n$  próximos a 1,0 indicam uma relação de sorção linear, ou seja, à medida que se eleva a concentração do herbicida em solução, ocorre aumento proporcional da sorção deste aos coloides do solo. Valores de  $1/n$  inferiores a 1,0 são classificadas como curvas do tipo L (côncava), em que ocorre diminuição dos sítios de sorção à medida que a concentração da solução aumenta, indicando saturação das superfícies. Valores de  $1/n$  maiores que 1,0 são classificadas como isotermas do tipo S (convexa), em que a sorção se eleva à medida que aumenta a concentração do herbicida na superfície dos coloides do solo (GILES et al., 1960; LANGARO, 2018). Este aumento no potencial de sorção com aumento da concentração ocorre devido à baixa afinidade do herbicida ao solo pela interferência de outras substâncias (SILVA et al., 2007).

Pode-se classificar as curvas obtidas nos Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA<sub>2</sub>) de Barreiras-BA (1,4452) e Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) de Mandaguaçu-PR (1,1245) como do tipo S. O Latossolo Amarelo (LA) de Linhares-ES (0,9077) e o Nitossolo Vermelho (NV) de Maringá-PR (0,8744), apresentaram curvas do tipo L e os demais solos do tipo C, com valores de 1/n variando de 0,9466 a 1,1, como relatado por Silva et al. (2007).

As isotermas de dessorção estão apresentadas na Figura 4. Os coeficientes de dessorção (K<sub>fd</sub>) foram maiores que os da sorção para todos os solos (Tabela 4). Esse fato indica que no equilíbrio sorção-dessorção, a dessorção é favorecida (LANGARO, 2018). Resultados semelhantes foram obtidos por YUE et al. (2017) que avaliaram a sorção do atrazine em solos. Por outro lado, ROCHA et al. (2013) observaram que quanto maiores os valores de K<sub>f</sub> na sorção do diuron nos solos estudados, menores eram os coeficientes de dessorção, sobretudo em solos com maiores teores de matéria orgânica. Nestes solos as ligações eram intensas e estáveis, tornando o processo menos reversível. Deve-se ressaltar que o diuron é um herbicida não iônico, ao contrario do indaziflam que é aniônico, o que pode explicar a diferença no processo de dessorção.

A dessorção de um herbicida ao longo do tempo pode ser benéfica, pois, favorece a liberação gradativa do herbicida sorvido para ser absorvido pelas plantas daninhas, reduzindo o risco de lixiviação. No entanto, se a sorção for alta e a dessorção for lenta, a quantidade de herbicida na solução do solo pode não ser suficiente para exercer o controle das plantas infestantes, mas suficiente para causar intoxicação em espécies sensíveis cultivadas em sucessão (*carryover*). Além disso, ALONSO et al. (2015) observaram que o indaziflam sofre transformações ao longo do tempo, por meio da ação de agentes químicos e biológicos, originando metabolitos que apresentam menor sorção, maior dessorção e maior mobilidade, aumentando o risco de contaminação ambiental e intoxicação de culturas.



**Figura 4** - Isotermas de dessorção do indaziflam em solos com valores de pH menores que 5,0 (A) e solos com valores de pH maiores que 5,5 (B).

GX: Gleissolo; LVA<sub>d</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>2</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; PVA<sub>d</sub>: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVA<sub>1</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; LVE<sub>f</sub>: Latossolo vermelho eutroférrico; LA: Latossolo Amarelo; LVA<sub>3</sub>: Latossolo Vermelho-Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; LV: Latossolo vermelho; LVE<sub>a</sub>: Latossolo Vermelho-Escuro álico.

A permanência do herbicida sorvido ao solo origina o fenômeno denominado histerese (H), que se caracteriza pela dificuldade do herbicida sorvido retornar à solução do solo (ARSEGO, 2009, ROCHA et al., 2013), indicando que a energia de ligação na dessorção é menor que a energia de ligação na sorção (ZHU & SELIM, 2000). Quanto maior a histerese maior será a irreversibilidade do processo de sorção (SEYBOLD & MERSIE, 1996). Em moléculas que apresentam baixa solubilidade em água, a exemplo do indaziflam ( $0,0028 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o principal mecanismo envolvido na histerese, pode ser devido à estrutura complexada com a matéria orgânica, onde a difusão da dessorção ocorre em menores taxas do que a cinética da sorção (ARSEGO, 2009).

Os índices de histerese observados deste trabalho variaram de 0,42 a 0,84 entre os solos (Tabela 3). Valores considerados baixos, indicando relativa facilidade de o indaziflam sorvido retornar à solução.

Verificou-se nos solos avaliados neste trabalho, que o teor de matéria orgânica, a CTC e o pH foram os principais atributos envolvidos no processo de sorção e dessorção do indaziflam, mesmo sendo observado baixa correlação entre o pH e K<sub>f</sub>s. Tal fato pode se dever à variação da matéria orgânica em solos com valores de pH próximos, camuflando os efeitos do pH. Entretanto, constatou-se que o

herbicida indaziflam possui baixo potencial de retenção nos solos, indicado pelos baixos índices de  $K_f$ s e histerese, o que mantém o herbicida mais disponível na solução do solo, favorecendo a absorção pelas plantas. Tal fato é interessante por se tratar de um herbicida aplicado em pré-emergência das plantas daninhas, contudo sua disponibilidade na solução possibilita a lixiviação para camadas mais profundas (JHALA et al., 2012), podendo contaminar corpos de água.

## **CONCLUSÕES**

A matéria orgânica foi o atributo que influenciou a sorção do indaziflam nos solos avaliados.

O pH exerceu maior influência sobre o processo de sorção em solos com menores teores de matéria orgânica.

O indaziflam apresentou baixo potencial de sorção nos solos estudados.

## 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.

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**, v. 239, p. 250-256, 2015.

ALVAREZ, V. H.; RIBEIRO, A. C. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Cap.8: Calagem. Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999.

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.

ARSEGO, I. B. **Sorção dos herbicidas diuron e hexazinone em solos de texturas contrastantes**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Piracicaba – SP, 2009.

ARSEGO, I. B. **Sorção dos herbicidas diuron e hexazinone em solos de texturas contrastantes**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Piracicaba – SP, 2009.

ASSIS, E. C.; SILVA, A. A.; BARBOSA, L. C.; QUEIROZ, M. E. L. R.; D'ANTONINO, L.; CRUZ, L. S. Sorption and desorption of picloram in soils under pastures in Brazil. **Planta Daninha**, v. 29, n. 4, p. 893-899, 2011.

BENOIT, P.; MADRIGAL, I.; PRESTON, C. M.; CHENU, C.; BARRIUSO, E. Sorption and desorption of non-ionic herbicides onto particulate organic matter from surface soils under different land uses. **European journal of soil Science**. v. 59, n. 2, p. 178-189, 2008.

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.

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.

BURNS, I. G.; HAYES, M. H. B.; STACEY, M. Studies of the adsorption of paraquat on soluble humic fractions by gel filtration and ultrafiltration techniques. **Pesticide Science**, v. 4, n. 5, p. 629-641, 2006.

CECON, P. R.; SILVA, A. R.; NASCIMENTO, M.; FERREIRA, A. Métodos estatísticos. Editora UFV, Viçosa-MG, 2012.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. Penso Editora, 2013.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson. **Revista Política Hoje**. v. 18, n. 1, 2009.

G, BRONNER; K. U GOSS. Sorption of organic chemicals to soil organic matter: influence of soil variability and pH dependence. **Environmental Science e Technology**. v. 45, p. 1307-1312, 2011.

G, BRONNER; K. U GOSS. Sorption of organic chemicals to soil organic matter: influence of soil variability and pH dependence. **Environmental Science e Technology**. v. 45, p. 1307-1312, 2011.

GILES, C. H.; MACEWAN, T. H.; NAKHWA, S. N.; SMITH, E. D. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *Journal of the Chemical Society*, v. 0, p. 3973-3993, 1960.

GONÇALVES, V. A. **Dinâmica do indaziflam em solos do Brasil avaliada pelas técnicas da planta indicadora e cromatografia**. 2018. 65f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

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 JR, 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.

HERRERO-HERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S.; POSE-JUAN, E.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, S.; ANDRADES, M. S.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J. Seasonal distribution of herbicide and insecticide residues in the water resources of the vineyard region of La Rioja (Spain). **Science of The Total Environment**, v. 609, p. 161-171, 2017.

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

KAMATA, M.; ASAMI, M.; MATSUI, Y. Presence of the  $\beta$ -triketone herbicide tefuryltrione in drinking water sources and its degradation product in drinking wa ters. **Chemosphere**, v. 178, p. 333-339, 2017.

LANGARO, A. C. **Sorção e lixiviação do Sulfentrazone em Latossolo Vermelho-Amarelo aplicado de forma isolada e em mistura com formulações de Glyphosate**. 2018. 95f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

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. 1-3, p. 462-468, 2010.

MARTINS, E. C.; BOHONE, J. B.; ABATE, G. Sorption and desorption of atrazine on soils: The effect of different soil fractions. **Geoderma**, v. 322, p. 131-139, 2018.

MELFI, J. A.; PEDRO, G. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil: Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 271-286, 2017.

MELLONI, R.; BELLEZE, G.; PINTO, A. M. S.; DIAS, L. B. P.; SILVE, E. M.; GUIMARÃES MELLONI, E. P.; ALCÂNTARA, E. N. Métodos de controle de plantas daninhas e seus impactos na qualidade microbiana de solo sob cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, 2013.

MU, Y.; LIU, X.; WANG, L. A Pearson's correlation coefficient based decision tree and its parallel implementation. **Information Sciences**. v. 35, p. 40-58, 2017.

OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. Guidelines for testing of chemicals: adsorption-desorption using a batch equilibrium method, 106. **OECD, Paris, France**, 44p, 2000.

PAES, J. M. V.; ANDREOLA, F.; Brito, C. H.; LOURDES, E. G. Decomposição da palha de café em três tipos de solo e sua influência sobre a CTC e o pH. **Ceres**, v. 43, n. 249, 1996.

PAROLO, M. E.; SAVINI, M. C.; LOEWY, R. M. Characterization of soil organic matter by FT-IR spectroscopy and its relationship with chlorpyrifos sorption. **Journal of environmental management**, v. 196, p. 316-322, 2017.

PATEIRO-MOURE, Mirian et al. Effect of organic matter and iron oxides on quaternary herbicide sorption–desorption in vineyard-devoted soils. **Journal of colloid and interface science**, v. 333, n. 2, p. 431-438, 2009.

PETTER, F. A.; FERREIRA, T. S.; SINHORIN, A. P.; LIMA, L. B. D.; MORAIS, L. A. D.; PACHECO, L. P. Sorption and desorption of diuron in Oxisol under biochar application. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 487-496, 2016.

RAMIREZ, A. C. R., TEIXEIRA, M. F., NEVES, A. A., QUEIROZ, M. E. L., DA SILVA, A. A., FURTADO, I. F., & DE 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**. v. 21, n. 3, p. 1-8, 2018.

ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; BORGES, L. G. F. C.; SILVA, L. O. C.; SILVA, A. A.; FERREIRA, E. A. Sorption and desorption of diuron in four brazilian latosols. **Planta Daninha**, v. 31, n. 1, p. 231-238, 2013.

SILVA, A. A ; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, VIVIAN R.; OLIVEIRA Jr. R. S. Herbicidas: Comportamento no solo. **Tópicos em manejo de plantas daninhas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa**, v. 2, p. 58-117, 2007.

SILVA, G. R., D'ANTONINO, L., FAUSTINO, L. A., SILVA, A. A., FERREIRA, F. A., & TEXEIRA, C. C. Sorption of fomesafen in Brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 31, n. 4, p. 971-977, 2013.

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.

TRIGO, C.; SPOKAS, K. A.; COX, L.; KOSKINEN, W. C. Influence of soil biochar aging on sorption of the herbicides MCPA, nicosulfuron, terbutylazine, indaziflam, and fluoroethyldiaminotriazine. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 62, n. 45, p. 10855-10860, 2014.

United States Environmental Protection Agency - US EPA. Fact Sheet for Indaziflam. 2010. Disponível em: [https://www3.epa.gov/pesticides/chem\\_search/reg\\_actions/registration/fs\\_PC-080818\\_26-Jul-10.pdf](https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf). Acesso em 16/06/2018.

YUE, L.; GE, C.; FENG, D.; YU, H.; DENG, H.; FU, B. Adsorption-desorption behavior of atrazine on agricultural soils in China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 57, p. 180-189, 2017.

## SORÇÃO DO INDAZIFLAM EM DUAS PROFUNDIDADES DOS SOLOS

**Resumo:** Os atributos do solo, tais como o pH, teor de matéria orgânica e textura, influenciam a sorção de um herbicida neste substrato. Herbicida de longa persistência no solo, o indaziflam, tem seu potencial de sorção dependente desses atributos, os quais variam ao longo do seu perfil. Tal fato pode influenciar no seu potencial de lixiviação para camadas mais profundas dos solos, causando contaminação ambiental. Nesta pesquisa, foram estimadas a sorção e dessorção do indaziflam em solos com diferentes características físicas e químicas, coletados em diferentes profundidades, por meio do método biológico e cromatográfico. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo (RQ), provenientes do município de Viçosa, MG e Fortuna de Minas, MG, respectivamente. Ambos foram coletados nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade. No ensaio biológico aplicaram-se doses crescentes do indaziflam em potes com capacidade de 0,300 dm<sup>3</sup> e semeou-se o sorgo (*Sorghum bicolor*) como espécie indicadora da presença do indaziflam. Aos 21 dias após emergência, foi realizada a avaliação de intoxicação e determinou-se o acúmulo de matéria seca da parte aérea. A análise de sorção por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) foi realizada utilizando concentrações de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 mg L<sup>-1</sup> de indaziflam em 0,01 mol L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub>. Após agitação constante pelo tempo de equilíbrio de 12 horas, o sobrenadante remanescente foi quantificado por meio de CLAE. Observou-se semelhança entre os resultados do ensaio biológico e cromatográfico, com maior sorção verificada na camada de 0-20 cm, nos dois solos, embora maior potencial sortivo tenha sido constatado no LVA. Os coeficientes de sorção estimados por CLAE foram considerados baixos em todas as amostras de solos, com variação entre 4,08 a 11,48 e a característica do solo que mais exerceu influência sobre a sorção foi o teor de matéria orgânica. Os coeficientes de dessorção foram maiores que os da sorção, indicando que o indaziflam retorna a solução do solo com intensidade elevada. Concluiu-se que a sorção do indaziflam foi maior na camada superficial dos solos, sendo influenciada pelo teor de matéria orgânica.

**Palavras-chave:** Adsorção, dessorção, perfil do solo

## SORPTION OF INDAZIFLAM IN TWO DEPTHS OF SOILS

**Abstract:** Soil attributes, such as pH, organic matter content and texture, usually affect the sorption of an herbicide in this substrate. A long persistence herbicide in soil, indaziflam, has its sorption potential dependent on these soil attributes, which vary throughout its profile. This fact may influence the leaching potential of this product to the deeper layers of the soil, causing environmental contamination. In this research, sorption and desorption of indaziflam were estimated in different depths of soils with distinct physical and chemical characteristics, using the biological and chromatographic method. A Red-Yellow Latosol (LVA) and a Cambisol (RQ), from the municipality of Viçosa, MG and Fortuna de Minas, MG, respectively, were collected in layers 0-20 and 20-40 cm deep. In the biological assay, increasing doses of indaziflam were applied in pots with a capacity of 0.300 dm<sup>3</sup> and sorghum (*Sorghum bicolor*) was seeded as an indicator of the presence of indaziflam. At 21 days after emergence, the intoxication evaluation was carried out and the accumulation of dry matter of the aerial part was determined. Sorption analysis using high performance liquid chromatography (HPLC) was performed using concentrations of 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 and 3.0 mg L<sup>-1</sup> indaziflam in 0.01 mol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>. After constant stirring at the equilibrium time of 12 hours, the remaining supernatant was quantified by HPLC. There was a similarity between the results of the biological and chromatographic tests. Higher sorption was observed in the 0-20 cm layer in both soils, although higher sorption potential was observed in the LVA. The sorption coefficients estimated by HPLC were considered low in all soil samples, with a variation between 4.08 and 11.48. The soil characteristic that most influenced the sorption was the organic matter content. The desorption coefficients were higher than those of the sorption, indicating that the indaziflam returns to the soil solution with high intensity. It was concluded that the sorption of indaziflam is higher in the surface layer of the soils, being influenced by the organic matter content.

**Keywords:** Adsorption, desorption, soil profile

## INTRODUÇÃO

O manejo inadequado das plantas daninhas pode resultar em prejuízos econômicos aos produtores, em razão da redução da produtividade das culturas (RIZZARDI, 2001; AMIN et al., 2014) e da qualidade do produto colhido (SOARES et al., 2010), além de dificultar a realização de tratos culturais e colheita (MONQUERO et al., 2014). Contudo, a utilização de herbicidas sem o conhecimento de suas interações com os atributos dos solos podem representar elevados riscos de contaminação ambiental (SILVA et al., 2007).

A falta de conhecimento das interações dos atributos do solo com herbicidas torna-se relevante quando os mesmos possuem longa persistência no ambiente. A persistência, em alguns casos, é benéfica, pois, mantém o controle das plantas daninhas por longos períodos. Por outro lado, se um herbicida permanece no solo por período prolongado, aumentam-se as chances de contaminação da água por intermédio da lixiviação, além do possível efeito de “*carryover*”, inviabilizando o cultivo de espécies sensíveis em sucessão (MONQUERO, 2014).

Uma vez aplicados, o destino final dos herbicidas é o solo, onde podem sofrer degradação biótica ou abiótica. Ao se ligarem aos coloides minerais e orgânicos do solo, estes podem ser sorvidos aos mesmos ou sofrerem processos de lixiviação no perfil do solo, podendo atingir mananciais de águas subterrâneas (SILVA et al., 2012). Entretanto, maior ou menor sorção do herbicida no solo influencia a absorção do composto pelas raízes das plantas e também os processos de degradação biológica, volatilização, lixiviação e transporte por escoamento superficial (HERWIG et al., 2001).

Com o aumento da pressão de seleção sobre as espécies tolerantes e biótipos de plantas resistentes aos herbicidas a estas moléculas, existe uma grande demanda por alternativas para o manejo das plantas daninhas. Entretanto, são poucas novas moléculas de herbicidas introduzidas no mercado mundial nos últimos anos (GUERRA et al., 2013), dentre as quais, pode-se destacar o indaziflam.

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), pertence a uma nova classe química de compostos denominada “alkylazine”, e atua no complexo celulose sintase na membrana plasmática das células, inibindo dessa forma, a síntese de celulose da parede celular (BRABHAM et al., 2014). O indaziflam também inibe a deposição de

cristais de celulose na parede celular da planta, afetando severamente sua formação, divisão e alongamento celular. Isso significa que em tecidos, órgãos e folhas totalmente desenvolvidas, não são ou dificilmente serão afetados pelo herbicida, visto que a formação da parede celular já está completa e não ocorre nenhuma nova síntese (KAAPRO & HALL, 2012).

O indaziflam possui baixa solubilidade em água ( $0,0028 \text{ kg m}^{-3}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o  $K_{oc} < 1.000 \text{ mL g}^{-1}$  de carbono orgânico,  $pK_a = 3,5$  e o  $\log K_{ow}$  em pH 4; 7 ou 9 = 2,8 (TOMPKINS, 2010). Possui longa persistência no solo (GONZALEZ-DELGADO et al. 2015), com a meia-vida maior que 150 dias (TOMPKINS, 2010).

O potencial de sorção do indaziflam em solos tropicais sofre influência dos atributos do solo. Em solos com baixos valores de pH e elevados teores de matéria orgânica, o indaziflam tende a ficar mais retido aos coloides do solo (GONÇALVES, 2018). Entretanto, estas e outras características variam entre solos e também com a profundidade no perfil dos mesmos, onde normalmente em camadas superficiais o teor de matéria orgânica e a atividade microbiana são maiores que nas camadas subsuperficiais (GUIJARRO et al., 2018).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar por meio de ensaio biológico e cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) a sorção e dessorção do indaziflam em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo (RQ), coletados a campo nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Foram conduzidos dois experimentos visando avaliar a sorção do indaziflam, o primeiro por meio de ensaio biológico, em casa de vegetação, e o segundo por meio de cromatografia líquida de alta eficiência, no laboratório de herbicida no solo do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Utilizou-se para os dois experimentos, amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) do município de Viçosa – MG ( $20^\circ44'49,7'' \text{ S}$ ;  $42^\circ50'33,5'' \text{ W}$ ) e um Cambissolo (RQ) do município de Fortuna de Minas – MG ( $19^\circ33'21,3'' \text{ S}$   $44^\circ27'48,2'' \text{ W}$ ), coletadas em áreas sem histórico de utilização de herbicidas, nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, cujas características físicas e químicas apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1-** Características físicas e químicas das amostras dos solos.

Análise química												
Solo	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m
	(H <sub>2</sub> O)	(mg dm <sup>-3</sup> )		------(Cmolc dm <sup>-3</sup> )-----								---(%)-
LVA 0-20 cm	5,5	14,1	157	1,9	0,9	0,1	5,1	3,2	3,3	8,3	39	3
LVA 20-40 cm	4,8	2,6	69	0,5	0,2	1	5,1	0,9	1,9	6,0	15	53
RQ 0-20 cm	6,4	175,7	38	2,9	0,3	0	2,3	3,3	3,3	5,6	59	0
RQ 20-40 cm	6,3	171	32	2,5	0,3	0	2,1	3,7	2,9	5,0	59	0

Análise física					
Solo	Areia	Silte	Argila	Classe textural	MO
	------(%)-----				(dag kg <sup>-1</sup> )
LVA 0-20 cm	38	8	54	Argilo-arenosa	3,5
LVA 20-40 cm	46	8	46	Argila	2,4
RQ 0-20 cm	81	10	9	Areia-franca	2,8
RQ 20-40 cm	78	9	13	Areia-franca	2,3

pH: água, KCl e CaCl<sub>2</sub>- relação 1:2,5. P-K: Extrator Mehlich 1. Ca-Mg e Al: Extrator: KCl – 1 mol L<sup>-1</sup>. H + Al – Acidez potencial – Extrator: acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>; 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

\*Análises realizadas segundo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa (1997).

### Sorção do indaziflam por meio de bioensaio

O experimento foi conduzido em esquema fatorial 10 x 5, com quatro repetições, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), onde o primeiro fator correspondeu a 10 doses crescentes do indaziflam e o segundo a cinco substratos diferentes, constituídos pelos solos apresentados na Tabela 1, mais um substrato inerte.

O substrato inerte constituído de areia lavada, segundo a metodologia proposta por BRAGA (2017). A areia lavada e as amostras de solo foram colocadas em vasos plásticos com capacidade de 0,300 dm<sup>3</sup>, com fundos vedados. Os substratos foram umedecidos até próximo à capacidade de campo onde foi realizada a semeadura de cinco sementes por vaso da espécie indicadora (*Sorghum bicolor*), a qual, segundo BRAGA (2017), é altamente sensível à presença do indaziflam em

solos. Posteriormente, foi realizada a aplicação do herbicida indaziflam nas diferentes doses para cada substrato. Sendo para a areia lavada (0 ;0,03;0,12; 0,25; 0,25; 0,50; 1,00;2,00; 3,00; 5,00 e 10,00 g ha<sup>-1</sup>) e para os solos (0 ; 2,00; 4,00; 8,00; 16,00; 24,00; 48,00; 64,00 e 100,00 g ha<sup>-1</sup>).

As doses são menores para o substrato inerte devido a esse no processo de lavagem, perder os seus sítios de sorção. Nas aplicações do herbicida foi utilizado pulverizador costal pressurizado com CO<sub>2</sub>, equipado com barra com dois bicos TT 11002, espaçados de 0,50 m, com pressão de 300 kPa e volume de calda de 150 L ha<sup>-1</sup>. Durante a aplicação, a temperatura foi de 24,0 °C, a velocidade do vento de 2,1 km h<sup>-1</sup> e a umidade relativa de 80%.

Durante a condução do experimento, os vasos receberam irrigações diárias mantendo-se sempre a umidade do solo próximo à capacidade de campo. Além disso, para manter o bom desenvolvimento das plantas, foi adicionada aos 7 e 14 dias após emergência (DAE), em cada vaso, solução de complementação nutricional equilibrada contendo NPK e micronutrientes, diferenciada para cada um dos substratos (solo e areia). Foram realizadas avaliações visuais de sintomas intoxicação das plantas de sorgo aos 7, 14 e 21 dias após emergência (DAE), atribuindo-se notas de 0 a 100, onde 0 corresponde à ausência de sintomas e 100 a morte das plantas.

Aos 21 DAE, as plantas foram cortadas rente ao solo e a parte aérea foi acondicionada em sacos de papel, que foram levados à estufa de circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) até atingir massa constante, para posterior determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) em balança com precisão de 0,0001 g. Os valores do acúmulo de matéria seca das plantas foram transformados para porcentagem em relação à testemunha, adotando-se 100 % para matéria seca da testemunha sem aplicação do herbicida.

Os dados relativos à matéria seca da parte aérea (MSPA) e intoxicação foram analisados por meio do modelo log-logístico não linear (Equação 1), proposto por STREIBIG (1993).

$$y = f(x) = c + \frac{d - c}{1 + \left(\frac{x}{b}\right)^a}$$

**Equação 1** - Modelo log-logístico não linear proposto por STREIBIG (1993).

Sendo  $y$  a variável de interesse,  $x$  a dose do herbicida e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  os parâmetros de ajuste da equação, de tal forma que  $c$  corresponde à assíntota mínima,  $d$  à assíntota máxima,  $b$  o valor intermediário entre as assíntotas máxima e mínima e  $a$ , a declividade da curva em torno de  $b$ . A partir da equação com os parâmetros definidos, estimou-se o ( $C_{50}$ ), que corresponde à dose do herbicida que reduziu em 50% o valor obtido para a assíntota máxima ( $d$ ).

De posse dos dados obtidos dos valores de  $C_{50}$  para cada solo e para areia, foi calculada a relação de sorção (RS) do solo em relação à resposta obtida em areia para a espécie indicadora (SOUZA, 1994):

$$RS = \frac{C_{50\text{ solo}} - C_{50\text{ areia}}}{C_{50\text{ areia}}}$$

**Equação 2** – Cálculo da relação de sorção, segundo SOUZA (1994).

### **Sorção e dessorção do indaziflam por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE)**

#### **Tempo de equilíbrio**

A determinação do tempo de equilíbrio do indaziflam nas diferentes amostras dos solos foi realizada empregando-se o método “batch equilibrium” (OECD, 2000). Foi utilizada uma solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , contendo  $1,00 \text{ mg L}^{-1}$  de indaziflam obtido a partir de uma solução estoque de  $1.000 \text{ mg L}^{-1}$  (grau de pureza 99,9%), da qual foram retirados  $10,00 \text{ mL}$ . Estes foram adicionados em tubos falcon de polipropileno contendo  $2,000 \text{ g}$  de solo, dos respectivos tratamentos. Os tubos foram colocados sob agitação vertical por 2:00; 4:00; 8:00; 12:00; 24:00 e 32:00 horas à temperatura de  $25,0 \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Finalizada a agitação, as amostras foram centrifugadas a  $2.260 \times G$ , por sete minutos, e em seguida parte do sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro millipore com membrana PTFE de  $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ . Esta operação foi realizada diretamente em “vials” com capacidade de  $1,50 \text{ mL}$ , para posterior análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), onde foi considerado como tempo de equilíbrio, 12 horas de agitação, que foi o tempo a partir do qual a concentração da solução analisada permaneceu constante.

### **Sorção do indaziflam**

Para avaliar a sorção do indaziflam foram utilizadas soluções nas concentrações de 0,50; 1,0; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00 mg L<sup>-1</sup> em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>. Adicionou-se 10,00 mL dessas soluções em tubos de polipropileno, com capacidade de 50,00 mL, contendo 2,000 g de solo. Em seguida, os tubos foram submetidos á agitação pelo tempo de equilíbrio de 12 horas, determinado no ensaio anterior. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 2.260 vezes a força da gravidade, por sete minutos, posteriormente parte do sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro millipore com membrana PTFE de 0,45 µm, diretamente para “vials” com capacidade de 1,50 mL para posterior análise cromatográfica.

O cálculo da quantidade de herbicida sorvido ao solo (Cs) em mg kg<sup>-1</sup> foi feito por diferença entre a quantidade de solução padrão inicialmente adicionada ao solo (Cp) em mg L<sup>-1</sup> e a quantidade encontrada na solução de equilíbrio (Ce) em mg L<sup>-1</sup>. A partir dos valores de Ce e de Cs, foi ajustada a equação de Freundlich (Cs = Kf Ce<sup>1/n</sup>) para obter os coeficientes de sorção, onde Kf é a capacidade de sorção e 1/n representa a intensidade de sorção, no entanto, ambas são constantes empíricas.

### **Dessorção do indaziflam**

Para avaliar a dessorção, os tubos provenientes da sorção foram colocados invertidos, para escoamento da solução do solo, por 24 horas. Decorrido o tempo de repouso, foram adicionados aos tubos, 10,00 mL da solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, isenta de herbicida, e submeteu-se a agitação pelo mesmo tempo de equilíbrio (12 h) e temperatura (25°C) empregados nos ensaios de sorção. Finalizada a agitação, as amostras foram novamente centrifugadas a 2.260 x G, por sete minutos, e parte do sobrenadante foi retirado e filtrado em membrana PTFE de 0,45 µm, diretamente para “vials” com capacidade de 1,50 mL para posterior análise cromatográfica.

As concentrações do herbicida dessorvidos ao solo (Cd) em mg kg<sup>-1</sup> foi calculada por diferença entre a quantidade sorvida ao solo (Cs) em mg kg<sup>-1</sup> e a quantidade que retornou para a solução de equilíbrio (Ce) em mg L<sup>-1</sup>. De posse do novo Cs e valores de Ce, ajustou-se a equação de Freundlich (Cs = Kf Ce<sup>1/n</sup>) para obtenção dos coeficientes de dessorção e interpretação dos resultados. A partir dos resultados das isotermas de sorção e dessorção, determinou-se o índice de histerese (H) para cada solo dividindo-se o 1/n de sorção por 1/n de dessorção, segundo metodologia proposta por PERUCHI et al. (2015).

## HPLC

A quantificação do indaziflam foi realizada em sistema de cromatografia líquida de alta eficiência. O equipamento utilizado foi um cromatógrafo modelo Shimadzu LC 20AT, com detector 43 DAD (Shimadzu SPD 20AT) e coluna C<sub>18</sub> de aço inox (Shimadzu VP- ODS Shim-pack 250 mm x 4,6 mm d. i. x 5 µm diâmetro de partículas). As condições cromatográficas para a análise foram fase móvel composta por água e acetonitrila na proporção 40/60 (v/v), contendo 0,01 mol L<sup>-1</sup> de ácido acético; com fluxo de 1,00 mL min<sup>-1</sup>; volume de injeção de 20 µL; comprimento de onda de 210 nm (RAMIREZ et al., 2018). Nessas condições o tempo de retenção do indaziflam foi de aproximadamente 7 minutos.

O método para determinação da sorção e dessorção foi validado segundo os parâmetros seletividade, linearidade, limites de detecção e quantificação. A linearidade foi determinada utilizando sete concentrações em triplicata 0,50 a 10,00 mg L<sup>-1</sup> em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>. A seletividade foi avaliada analisando os sobrenadantes resultantes da agitação do solo com 10,00 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> isenta e com a presença de indaziflam.

## Análises estatísticas

Foi utilizada a isoterma de Freundlich para descrever a sorção e dessorção do indaziflam nos solos. Ambas as curvas do ensaio biológico e do método cromatográfico foram plotadas utilizando-se o programa estatístico SigmaPlot versão 12,6.

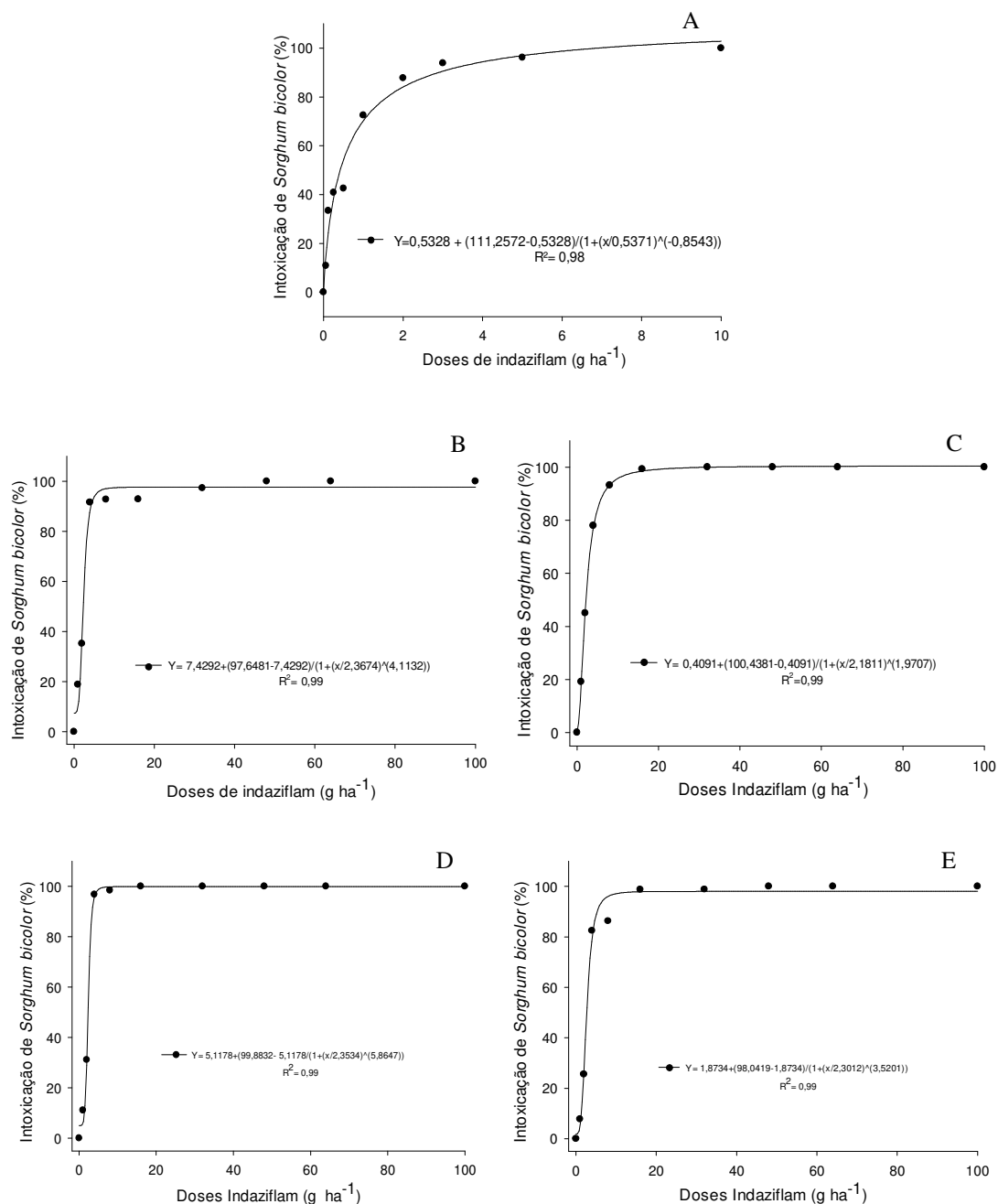
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Sorção do indaziflam por método biológico

Os gráficos com as curvas de dose resposta da intoxicação das plantas de sorgo cultivadas em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e do Cambissolo (RQ), coletados nas camadas de 0-20 e 20-40 cm e areia lavada estão apresentados na Figura 1. Observou-se que na areia lavada houve intoxicação e morte das plantas em doses inferiores aos solos, por se tratar de um substrato inerte, resultando também, em valores de C<sub>50</sub> inferiores aos solos (Tabela 2). A areia lavada não possui sítios de ligações aos herbicidas. Assim, suas moléculas ficam prontamente disponíveis na

solução do solo para serem absorvidos pelas plantas, causando intoxicação nas plântulas do sorgo em menores doses, em relação aos solos.

As variáveis adequaram-se perfeitamente ao modelo log-logístico não-linear proposto por STREIBIG et al (1993).



**Figura 1-** Intoxicação de plantas (%) de *Sorghum bicolor* submetidas à aplicação de doses crescentes do indaziflam, em areia lavada (A), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletado na camada de 0-20 cm (B) e 20-40 cm (C) e Cambissolo (RQ) coletado na camada de 0-20 cm (D) e 20-40 cm (E).

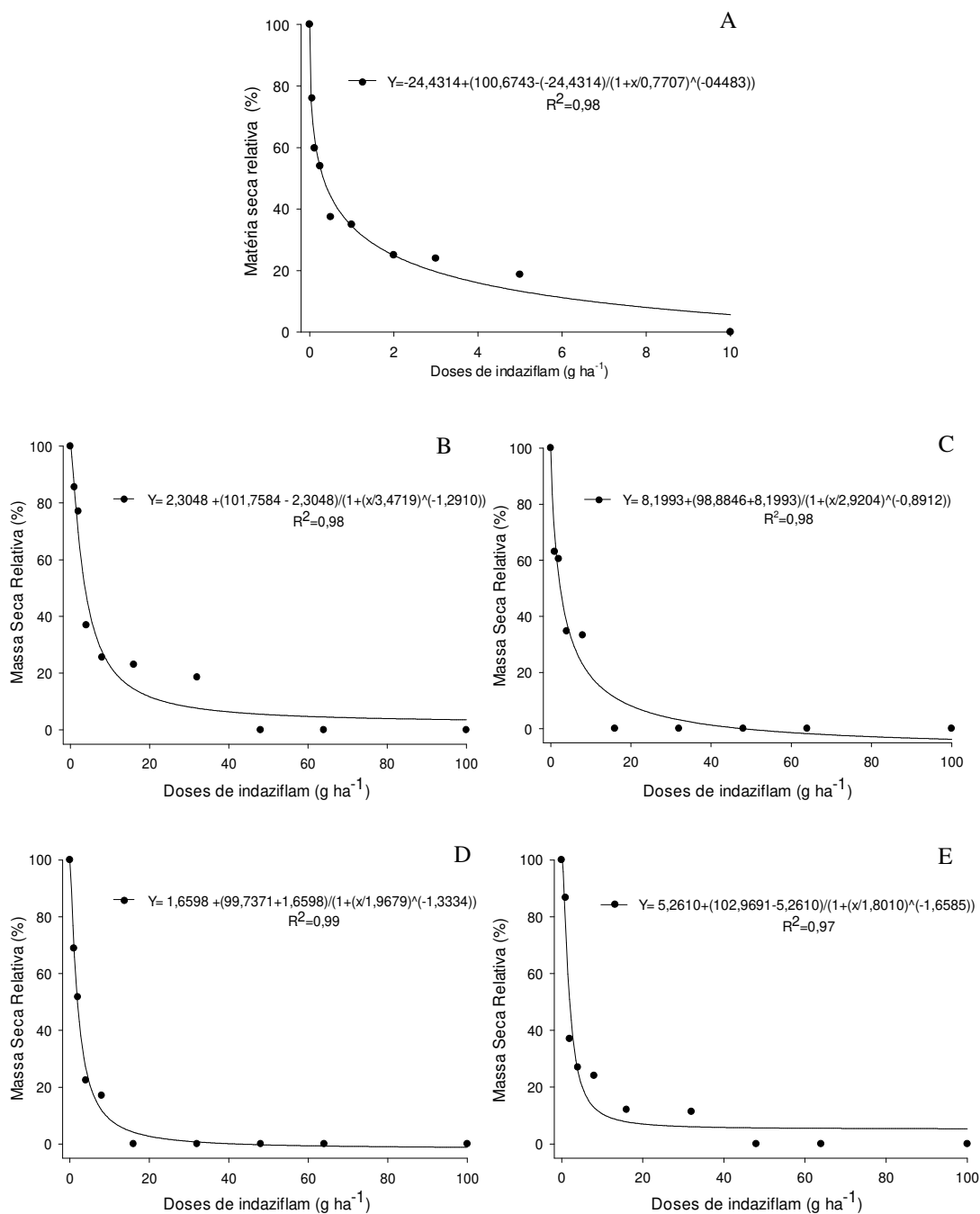
As variáveis  $C_{50}$  e razão de sorção (RS) da intoxicação de plantas foram semelhantes em todos os solos, com valores entre 2,18 e 2,37 e entre 3,03 e 3,39 da  $C_{50}$  e RS, respectivamente (Tabela 2). Valores de  $C_{50}$  em doses muito baixas do herbicida para todos os solos indicam alta sensibilidade do sorgo para detectar o herbicida associado à baixa retenção deste ao solo, indicado pelos baixos valores obtidos para a RS, que compara a disponibilidade do herbicida na solução do solo em relação ao substrato inerte.

**Tabela 2** - Dose de indaziflam que provocou 50% de intoxicação ( $C_{50}$ ) e razão de sorção (RS) na planta de *Sorghum bicolor* em amostras de Cambissolo (RQ) e Latossolo Vermelho-Amarelo, coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

	Areia	LVA (0-20 cm)	LVA (20-40 cm)	RQ (0-20 cm)	RQ (20-40 cm)
$C_{50}$	0,54	2,37	2,18	2,35	2,30
RS		3,39	3,03	3,35	3,26

Os valores de  $C_{50}$  e RS para a variável de massa da matéria estão apresentados na Figura 2 e Tabela 3. Todavia, entre os solos, houve respostas a maiores doses, que proporcionaram maiores valores de  $C_{50}$  e RS, constatados no LVA coletado na camada 0-20 cm, seguido do LVA coletado na camada 20-40 cm (Tabela 3). No RQ, houve pouca variação entre as profundidades, embora maiores valores de  $C_{50}$  e RS tenham sido constatados na camada superficial.

A maior RS do LVA coletado na camada de 0-20 cm pode ser devida ao maior teor de matéria orgânica, quando comparado aos demais. Sabe-se que o teor de matéria orgânica fornece superfícies absorventes ao solo, o qual aumenta os sítios de adsorção das moléculas (TRIGO et al., 2014). BENITO et al. (2018) observaram que a adição de materiais orgânicos estabilizados ao solo, promove aumento de sítios sortivos, contribuindo a uma maior retenção das moléculas no solo.



**Figura 2** - Acúmulo matéria seca relativa (%) comparada à testemunha de plantas de *Sorghum bicolor* submetidas à aplicação de doses crescentes do indaziflam, em areia lavada (A), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletado na camada de 0-20 cm (B) e 20-40 cm (C) e cambissolo (RQ) coletado na camada de 0-20 cm (D) e 20-40 cm (E).

**Tabela 3** - Dose de indaziflam capaz de reduzir em 50% o acúmulo de matéria seca da parte aérea ( $C_{50}$ ) e relação de sorção (RS) na planta de *Sorghum bicolor* em amostras de diferentes solos e profundidades.

	Areia	LVA (0-20 cm)	LVA (20-40 cm)	RQ (0-20 cm)	RQ (20-40 cm)
$C_{50}$	0,77	3,47	2,92	1,97	1,80
RS		3,50	2,79	1,55	1,33

O indaziflam possui um valor de Kow de 2,8, sendo considerado um herbicida pouco polar, além de possuir baixa solubilidade em água (TOMPKINS, 2010). Herbicidas pouco polares e pouco solúveis tendem a ser adsorvidos a matéria orgânica, por meio de ligações hidrofóbicas, força de van der Waals e ligações de hidrogênio (SILVA et al., 2007; PRATA, 2008; CRISTOFFOLETI et al., 2009).

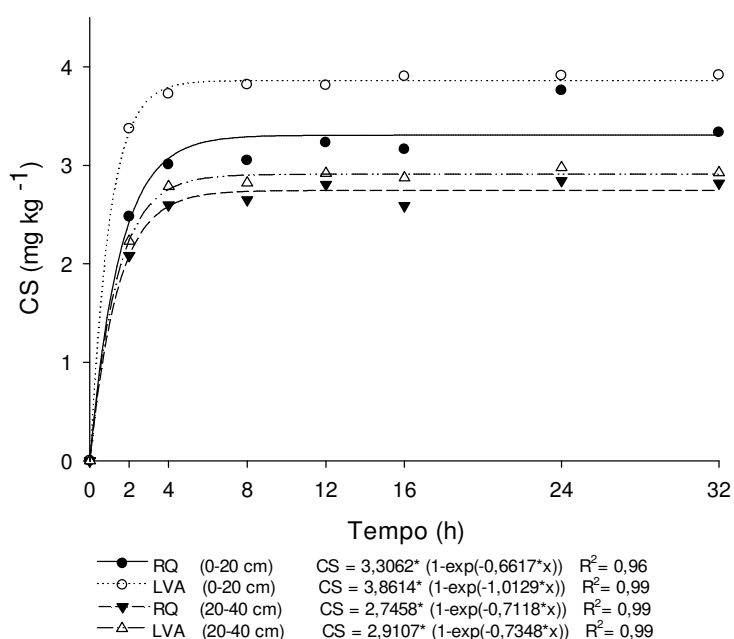
A  $C_{50}$  e RS para o indaziflam foram relativamente baixas, quando comparadas a outros herbicidas, sobretudo aqueles aplicados em pré-emergência (Tabela 3). FREITAS et al. (2014) avaliaram a sorção do sulfentrazone em diferentes solos, observaram valores de  $C_{50}$  do acúmulo de matéria seca de *Sorghum bicolor* variando de 48,36 a 251,37 g ha<sup>-1</sup>, os quais são maiores que os obtidos neste estudo. Além disso, esses autores atribuíram os maiores valores de  $C_{50}$  e RS a solos com maiores teores de matéria orgânica. Outro fator que contribui para a baixa sorção do indaziflam nos solos é a sua dose (100 g ha<sup>-1</sup>), que quando comparada a outros herbicidas, é extremamente baixa. Como exemplo tem-se a dose do sulfentrazone que são maiores que 800 g ha<sup>-1</sup>.

Dentro do mesmo solo, ocorreu variação da  $C_{50}$  e RS entre as profundidades, com maiores valores da dose necessária para causar 50% de inibição do acúmulo de matéria seca, obtidos nas camadas de 0-20 cm, em ambos os solos (Tabela 3).

### **Sorção do indaziflam por método cromatográfico**

A cinética de sorção se caracterizou por duas fases distintas (Figura 3). A primeira foi uma sorção rápida, devido aos sítios de adsorção dos solos estarem amplamente disponíveis para ocupação pelas moléculas do indaziflam. A segunda fase caracterizou-se por uma sorção lenta, devido aos sítios já estarem ocupados pelas moléculas do herbicida, ocorrendo repulsão das mesmas e diminuindo o potencial de sorção (LIU et al., 2010). Este fato é corroborado por FARIA (2016); PASSOS et al. (2013) e PEREIRA (2016), que avaliaram o tempo de equilíbrio de

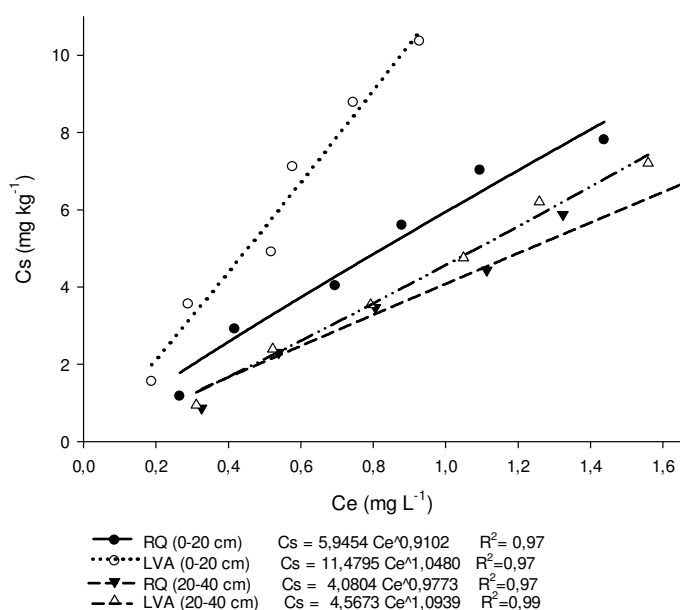
alguns herbicidas em diferentes solos, descrevendo comportamento semelhante ao que foi relatado nesse estudo.



**Figura 3** - Estimativa da cinética de sorção do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (RQ), coletados nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

O tempo de equilíbrio obtido nas curvas de cinética de sorção foi de oito horas, para todos os solos (Figura 3), mas, por questão de maior segurança na obtenção dos dados, optou-se em adotar o tempo de 12 h nas avaliações deste trabalho, corroborando com o trabalho realizado por GONÇALVES (2018).

O modelo da isoterma de Freundlich ajustou-se adequadamente para descrever a sorção do indaziflam nos solos, como indicado pelos coeficientes de determinação das equações ( $R^2$ ), que foram iguais ou superiores a 0,97 (Figura 4). O valor de  $1/n$ , que indica a linearidade do modelo (SCHWARZENBACH et al., 2005), foi menor para o RQ 0-20 cm, com valor de 0,91, caracterizando-se como isoterma do tipo L, onde o valor do  $1/n$  é menor que um. Em isotermas do tipo L a taxa de sorção decresce com o aumento da concentração do herbicida, devido à ocupação rápida dos sítios de sorção, pelas moléculas reduzindo a sorção. O índice  $1/n$  dos demais solos aproximou-se de um, caracterizando-se por isotermas do tipo C, onde a sorção aumenta de acordo com o aumento da concentração do indaziflam nos solos (BENITO et al., 2018).



**Figura 4** - Isotermas da sorção do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (RQ), coletados nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

A sorção foi maior na camada de 0-20 cm para os dois solos (Figura 4: Tabela 4). O LVA possui 33% e o RQ 18% a mais de teor de matéria orgânica na camada de 0-20 cm em relação à de 20-40 cm (Tabela 1), variações do teor de matéria orgânica dos solos, podem promover incrementos consideráveis na sorção de herbicidas em solos (ROCHA et al., 2013). BRAGA (2017) observou maiores valores de coeficientes de sorção (Kf) para o indaziflam em solos com maiores teores de matéria orgânica.

**Tabela 4** - Coeficientes de sorção e dessorção (Kf), coeficiente de linearidade (1/n), e índice de histerese (H) do indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (RQ), nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

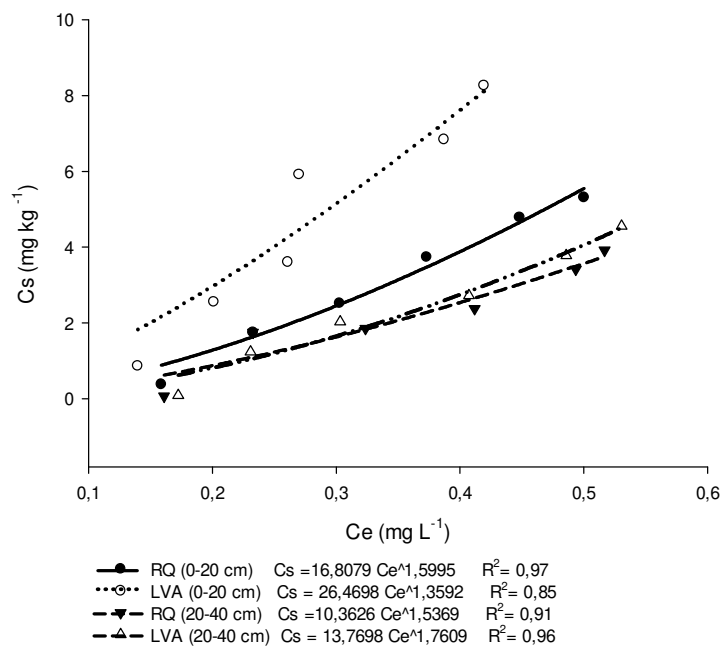
	LVA 0-20 cm	RQ 0-20 cm	LVA 20-40 cm	RQ 20-40 cm
Kf Sorção	11,4795	5,9454	4,5673	4,0804
1/n Sorção	1,0480	0,9102	1,0939	0,9773
Kf Dessorção	26,4698	16,8079	13,7698	10,3626
1/n Dessorção	1,3592	1,5995	1,7609	1,5369
H	0,7710	0,5691	0,6212	0,6359

Em camadas superficiais dos solos, sobretudo, no horizonte A, o teor de matéria orgânica é maior, devido à decomposição de resíduos vegetais e animais, sendo assim, a sorção aumenta, devido à presença da maior superfície específica e sítios de adsorção, conferidos por esse componente do solo (KEARNS et al., 2014). Como se trata de um herbicida com baixa solubilidade em água, o indaziflam como comentado anteriormente pode ser atraído fisicamente aos sítios hidrofóbicos da matéria orgânica, aumentando o processo de adsorção (ARAÚJO & MELO, 2012). Além disso, as moléculas da matéria orgânica podem sofrer mudanças em sua estrutura, aumentando ou reduzindo o número de sítios hidrofóbicos ativos, o que influencia diretamente na capacidade de sorção, principalmente de herbicidas lipofílicos (SILVA et al., 2012; PEREIRA et al., 2016).

Contudo, além do teor de matéria orgânica, as camadas superficiais apresentaram maiores valores de capacidade de troca catiônica (CTC) (Tabela 1). A CTC dos solos está diretamente relacionada ao teor de matéria orgânica em razão da sua maior superfície específica e à grande quantidade de sítios de troca iônica, fornecidas por meio de sua dissociação em grupamentos funcionais, como ácidos fenólicos e carboxílicos (VALADARES, 2015), o que confere aumento dos sítios de adsorção do solo, disponíveis aos herbicidas. PASSOS (2015) observou correlação de mais de 90% entre a CTC dos solos e o teor de matéria orgânica, do mesmo modo REGITANO et al. (2001) observou correlação significativa de 0,92 entre esses atributos.

Os valores de  $K_f$  corroboram com os resultados, apresentados por GONÇALVES (2018) e ALONSO et al. (2011), que estudando o indaziflam, encontraram índices de  $K_f$  semelhantes ao deste trabalho. Tal fato caracteriza o indaziflam, como herbicida de baixa capacidade sortiva, de forma análoga ao resultado do ensaio biológico, pelos valores baixos de  $C_{50}$  e relação de sorção (Tabela 3).

Os valores de  $K_f$  e  $1/n$  da dessorção foram superiores aos valores da sorção (Tabela 4). Normalmente, em solos com elevada capacidade sortiva, a dessorção pode ser desfavorecida, devido à interação forte, sobretudo com a estrutura da matéria orgânica, dificultando o retorno do herbicida para a solução do solo (ROCHA et al., 2013).



**Figura 5** - Isotermas de dessorção de indaziflam em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo (RQ), coletados nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

A dessorção dos herbicidas determina a taxa de liberação e o potencial de mobilidade desses compostos nos solos (YAVARI et al., 2016). Sendo assim, nas camadas superficiais dos solos com maior teor de matéria orgânica, há maior retenção do herbicida (alta sorção e baixa dessorção), o que diminui a disponibilidade deste na solução do solo. Contrariamente, solos de camadas mais profundas, com baixos teores de matéria orgânica, facilitam o processo de dessorção, o que segundo ROCHA et al. (2013) pode favorecer a movimentação do herbicida no perfil, aumentando o risco de contaminação de corpos de água subterrâneos.

O índice de histerese (H) é calculado, dividindo-se o  $1/n$  da sorção pelo  $1/n$  da dessorção. Sendo assim, um valor de  $1/n$  de dessorção maior que o  $1/n$  da sorção, implica em menor valor de histerese. Índices elevados de histerese indicam maior dificuldade do herbicida sorvido, retornar a solução do solo, possibilitando maior permanência deste no ambiente, sobretudo sorvido aos colóides do solo, enquanto que valores extremamente baixos indicam uma rápida dessorção (KOSKINEN et al., 2006; FARIA, 2018). Entre as amostras dos solos estudados, maior índice de H foi constatado no LVA 0-20 cm. Evidenciando a interação forte com o teor de matéria orgânica, retendo o herbicida, tornando o processo quase que irreversível (GONÇALVES, 2018).

Os resultados da análise cromatográfica e do ensaio biológico demonstram que o indaziflam é um herbicida que possui baixa capacidade de sorção nos solos. Esse fato é importante, pois uma vez disponível na solução do solo, este estará disponível para absorção pelas plantas daninhas, exercendo controle. No entanto, pode ocorrer lixiviação, alcançando camadas inferiores no solo, e nessas camadas a sorção é menor o que pode intensificar o processo de transporte, sendo plausível a contaminação de águas subterrâneas. Além disso, este pode ter sua persistência intensamente prolongada nas camadas subsuperficiais, devido a menor degradação pela microbiota do solo, pois, a população de microrganismos, responsáveis pela degradação dos herbicidas, encontram-se em maior população nos primeiros 5 cm de profundidade nos solos.

## **CONCLUSÕES**

A sorção do indaziflam foi maior nas camadas de 0-20 cm nos dois solos estudados.

Maiores índices de sorção foram constatados no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) em relação ao Cambissolo (RQ).

O teor de matéria orgânica foi o atributo do solo mais influenciou na sorção 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.

AMINI, R.; ALIZADEH, H.; YOUSEFI, A. Interference between red kidneybean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars and redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.). **European journal of agronomy**, v. 60, p. 13-21, 2014.

BENOIT, P.; MADRIGAL, I.; PRESTON, C. M.; CHENU, C.; BARRIUSO, E. Sorption and desorption of non-ionic herbicides onto particulate organic matter from surface soils under different land uses. **European Journal of Soil Science**, v. 59, n. 2, p. 178-189, 2008.

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. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

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.

BROSNAN, J. T.; MCCULLOUGH, P. E.; BREEDEN, G. K. Smooth crabgrass control with indaziflam at various spring timings. **Weed Technology**. v. 25, n. 3, p. 363-366, 2011.

CHRISTOFFOLETI, P. J., LÓPEZ-OVEJERO, R. F., DAMIN, V., CARVALHO, S. J. P., & NICOLAI, M.. Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, 2009.

Empresa brasileira de Pesquisa agropecuária (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p .

FARIA A. T. **Sorção, dessorção, meia-vida e lixiviação do tembotrione em solos com diferentes atributos**. 2016. Tese (doutorado em fitotecnia) apresentada a Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG.

GONÇALVES, V. A. **Dinâmica do indaziflam em solos do Brasil avaliada pelas técnicas da planta indicadora e cromatografia**. 2018. 65f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

GONZÁLEZ-DELGADO, A. M.; ASHIGH, J.; SHUKLA, M. K.; PERKINS, R. Mobility of indaziflam influenced by soil properties in a semi-arid area. **PloS one**, v. 10, n. 5, p. e0126100, 2015.

GUERRA, N.; DE 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.

GUIJARRO, K. H.; APARICIO, V.; DE GERÓNIMO, E.; CASTELLOTE, M.; FIGUEROLA, E. L.; COSTA, J. L.; ERIJMAN, L. Soil microbial communities and glyphosate decay in soils with different herbicide application history. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 974-982, 2018.

HUERTAS-PÉREZ, J. F.; DEL OLMO IRUELA, M.; GARCÍA-CAMPAÑA, A. M.; GONZÁLEZ-CASADO, A.; SÁNCHEZ-NAVARRO, A. Determination of the herbicide metribuzin and its major conversion products in soil by micellar electrokinetic chromatography. **Journal of Chromatography A**. v. 1102, p. 280–286, 2005.

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

JHALA, A. J.; RAMIREZ, A. H.; 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. **Pak J Weed Sci Res**, v. 18, p. 267-270, 2012.

KAWAMOTO, K.; URANO, K. Parameters for predicting fate of organochlorine pesticides in the environment (I) octanol-water and air-water partition coefficients. **Chemosphere**, v. 18, n. 9-10, p. 1987-1996, 1989.

KEARNS, J. P.; WELLBORN, L. S.; SUMMERS, R. S.; KNAPPE, D. R. U. 2,4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data. **Water research**, v. 62, p. 20-28, 2014.

KOSKINEN, W. C.; CALDERÓN, M. J.; RICE, P. J.; CORNEJO, J. Sorption-desorption of flucarbazone and propoxycarbazon and their benzenesulfonamide and triazolinone metabolites in two soils. **Pest management science**, v. 62, n. 7, p. 598-602, 2006.

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. 1-3, p. 462-468, 2010.

MARÍN-BENITO, J. M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J.; ORDAX, J. M.; DRAOUI, K.; AZEJJEL, H.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S. Organic sorbents as barriers to decrease the mobility of herbicides in soils. Modelling of the leaching process. **Geoderma**, v. 313, p. 205-216, 2018.

Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA), AGROFIT (2003). Link: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons) Acessado em 02/06/2018.

MONQUERO, P.A. **Aspectos da Biologia das Plantas Daninhas**. São Carlos, SP. Rima Editora, 2014. 430p.

OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. Guidelines for testing of chemicals: adsorption-desorption using a batch equilibrium method, 106. **OECD, Paris, France**, 2000, 44p.

PASSOS, A. B. R.; FREITAS, M. A. M.; TORRES, L. G.; SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. L.; LIMA, C. F. Sorption and desorption of sulfentrazone in Brazilian soils. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 48, n. 8, p. 646-650, 2013.

PEREIRA, G. A. M. **Comportamento do clomazone em solos tropicais**. 2016. Tese (doutorado em fitotecnia) apresentada a Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG.

PEREIRA, G. A. M.; BARCELLOS JR, L. H.; GONCALVES, V. A.; SILVA, D. V.; FARIA, A. T.; SILVA, A. A. Sorption of Clomazone in Brazilian Soils with Different Physical and Chemical Attributes 1. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 357-364, 2016.

PRATA, F; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. **Revista Biociências**, v. 6, n. 2, 2008.

RAMIREZ, A. C. R., TEIXEIRA, M. F., NEVES, A. A., QUEIROZ, M. E. L., DA SILVA, A. A., FURTADO, I. F., & DE 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**. v. 21, n. 3, p. 1-8, 2018.

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.

RIZZARDI, M. A.; FLECK, N. G.; VIDAL, R. A., MEROTTO JR, A.; AGOSTINETTO, D. Competição por recursos do solo entre ervas daninhas e culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.4, p.707-714, 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.

SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P. M.; IMBODEN, D. M. Sorption I: general introduction and sorption processes involving organic matter. **Environmental Organic Chemistry**, p. 275-330, 2005.

SEEFELDT, S. S.; JENSEN, S. E.; FUERST, E. P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationship. **Weed Technology**. v. 9, p. 218-227, 1995.

SILVA, A. A. & SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**, Viçosa, MG. Editora UFV, 2007. 367 p.

SILVA, A. A.; VIVIAN, R.; OLIVEIRA JR., R. S. Herbicidas: comportamento no solo. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2007. 367 p.

SILVA, A. F.; LOURENCETTI, C.; DORES, E.F. G. C. Influência da temperatura, umidade e profundidade do solo na persistência do diuron e sulfato de endossulfam em um solo tropical. **Química Nova**, v. 33, n.7, p. 1457-1463, 2010.

SOARES, I. A. A.; FREITAS, F. C. L.; NEGREIROS, M. Z.; FREIRE, G. M.; AROUCHA, E. M. M.; GRANGEIRO, L. C.; DOMBROSKI, J. L. D. Interferência das plantas daninhas sobre a produtividade e qualidade de cenoura. **Planta daninha**, v. 28, n. 2, p. 247-254, 2010.

STREIBIG, J. C.; RUDEMO M.; JENSEN J. E. Dose-response curves and statistical models. **Herbicide bioassays**, p. 29-55, 1993.

TOMPKINS, J. 2010. **Pesticide Fact Sheet: Indaziflam**. Environmental Protection Agency. Unites States. Disponível em: <[http://www.epa.gov/opp00001/chem\\_search/reg\\_actions/registration/fs\\_PC-80818\\_26-Jul-10.pdf](http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-80818_26-Jul-10.pdf)> Acessado em: 04 de abril de 2017.

TRIGO, C.; SPOKAS, K. A.; COX, L.; KOSKINEN, W. C. Influence of soil biochar aging on sorption of the herbicides MCPA, nicosulfuron, terbuthylazine, indaziflam, and fluoroethyldiaminotriazine. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 62, n. 45, p. 10855-10860, 2014.

YAVARI, S.; MALAKAHMAD, A.; SAPARI, N. B.; YAVARI, S. Sorption-desorption mechanisms of imazapic and imazapyr herbicides on biochars produced from agricultural wastes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, p. 3981-3989, 2016.

## LIXIVIAÇÃO DO INDAZIFLAM EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SUBMETIDO A PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS DE 60 E 240 MM

**Resumo:** Aplicações de herbicidas sem o conhecimento prévio de suas interações com os atributos dos solos e condições climáticas podem resultar na perda de eficiência agrônômica e contaminação de corpos de águas superficiais e subterrâneas. Este problema torna-se ainda mais grave quando se aplica herbicidas de maior tempo de meia-vida, como o indaziflam. Neste trabalho foi avaliada a lixiviação do indaziflam em amostras de solos (Latossolo Vermelho-Amarelo - LVA), coletados nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, submetidas a diferentes lâminas de precipitação pluvial (60 e 240 mm) por meio de método biológico e cromatográfico. Para isso foram utilizadas colunas de PVC com 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, preenchidas com as amostras dos respectivos solos. Foi aplicado o indaziflam no topo destas colunas na dose comercial ( $100 \text{ g ha}^{-1}$ ). Decorridas 12 horas após a aplicação, foram simuladas chuvas de 60 mm, aplicada integralmente, e de 240 mm, aplicada de forma intermitente (60 mm a cada 2 dias). Após 72 horas, as colunas foram seccionadas a cada 5 cm e amostras foram coletadas para análises cromatográficas e condução de bioensaio, utilizando *Sorghum bicolor* como planta indicadora. Foi possível detectar o indaziflam por meio do bioensaio até 25 e 30 cm de profundidade com a precipitação de 60 e 240 mm, respectivamente, para o solo da camada 0-20 cm e, até 30 e 35 cm de profundidade com a precipitação de 60 e 240 mm, respectivamente, para amostras de solo coletadas na profundidade de 20 a 40 cm. Com o método cromatográfico foi possível quantificar o indaziflam somente até os 10 cm de profundidade, independente do solo e da lâmina de precipitação. A menor detecção do cromatógrafo em relação ao bioensaio se deveu ao limite de quantificação do equipamento, ou seja, valores de concentrações abaixo do limite, presentes na solução lixiviada não são quantificados. Conclui-se que a intensidade da precipitação influencia diretamente no potencial de lixiviação do indaziflam. Maior lixiviação do indaziflam foi observada nas amostras de solo da camada de 20 a 40 cm em razão do menor teor de matéria orgânica e textura mais arenosa do solo estudado.

**Palavras-chave:** herbicida, mobilidade, lixiviação.

## LEACHING OF INDAZIFLAM IN RED-YELLOW LATOSOL SUBJECTED TO RAINFALL OF 60 AND 240 MM

**Abstract:** Herbicide applications without prior knowledge of their interactions with soil attributes and climatic conditions may result in loss of agronomic efficiency and contamination of surface and groundwater. This problem becomes even more serious when applying longer half-life herbicides such as indaziflam. In this work, the indaziflam leaching was evaluated in samples of soils (Red-Yellow Latosol - LVA), collected in the layers of 0-20 and 20-40 cm, submitted to different water levels (60 and 240 mm), by both biological and chromatographic method. Thus, PVC columns with 10 cm diameter and 50 cm length were used filled with samples of the respective soils. Indaziflam was applied to the top of these columns at the commercial dose (100 g ha<sup>-1</sup>). Twelve hours after the application, 60 mm of simulated rainfall was fully applied, while 240 mm applied intermittently (60 mm every 2 days). After 72 hours, columns were sectioned every 5 cm and samples were collected for chromatographic analysis and bioassay conduction, using Sorghum bicolor as an indicator plant. Indaziflam was detected by means of the bioassay up to 25 and 30 cm of depth with the precipitation of 60 and 240 mm, respectively, for the soil of the layer 0-20 cm. The herbicide was also detected up to 30 and 35 cm of depth with the precipitation of 60 and 240 mm, respectively, for soil samples collected at depths of 20 to 40 cm. By the chromatographic method, it was possible to quantify indaziflam only up to 10 cm depth, regardless of soil and rainfall. The lower detection of the chromatograph in relation to the bioassay was due to the limit of quantification of the equipment. That is, values of concentrations below the limit present in the leached solution are not quantified. It is concluded that the precipitation intensity directly influences the leaching potential of indaziflam. Higher indaziflam leaching was observed in the soil samples of the 20 to 40 cm layer due to the lower organic matter content and the sandy texture of the studied soil.

**Keywords:** herbicide, mobility, leaching

## INTRODUÇÃO

No processo de lixiviação, as moléculas de um herbicida podem ser percoladas no perfil do solo, atingindo camadas profundas, podendo contaminar corpos de água subterrâneos e superficiais (QUEIROZ et al., 2011). Frequentemente, tem sido detectada a presença de herbicidas em corpos de água, anos após a aplicação desses produtos no solo (SASSINI et al., 2017; SCHOLZ-STARKE et al., 2018; WEISSINGER et al., 2018).

As características de um solo são heterogêneas no decorrer do seu perfil, ou seja, à medida que se avança em profundidade, os atributos tornam-se discrepantes da camada inicial, como, por exemplo, redução do teor de matéria orgânica, alterações de pH e redução da população microbiana (OLIVEIRA & BRIGHENTI, 2011). Aliado a esse fato, se a molécula de um herbicida for transportada a uma maior profundidade, esta pode ter sua dinâmica alterada, aumentando ou diminuindo o risco de contaminação ambiental. Além disso, pode ser reduzida a eficiência de controle, pois, a maioria das sementes de plantas daninhas encontra-se na camada superficial do solo.

Moléculas de herbicidas que apresentam elevada solubilidade em água, tendem a estar mais sujeitas a movimentação no solo, sendo que aquelas que são poucos solúveis podem ter o seu transporte limitado (OLIVEIRA JR & REGITANO, 2009). Além disso, quanto menor a solubilidade em água do herbicida maior será a afinidade pela matéria orgânica do solo, principal sítio de sorção de herbicidas pouco solúveis nesse líquido (PEREIRA et al., 2017).

Sabe-se que as condições climáticas influenciam diretamente na dinâmica dos herbicidas no solo, sendo a incidência de chuvas uma das mais atuantes sobre a mobilidade desses compostos no ambiente, pois podem carrear a molécula no perfil do solo, causando maior lixiviação. A precipitação pluvial sofre flutuações no decorrer do ano, ocorrendo em algumas épocas maior intensidade de chuvas, podendo ocasionar maior mobilidade dos herbicidas no ambiente, acarretando maior impacto ambiental (GUERRA et al., 2016). Além disso, a própria irrigação das culturas, se realizada de forma inadequada, pode potencializar a translocação dos herbicidas. Este fato agrava-se quando se aplica no ambiente, herbicidas que apresentam elevado período residual, a exemplo do indaziflam, permanecendo por longo período no solo, estando sujeito às variações climáticas.

O indaziflam foi registrado no Brasil no ano de 2016, para as culturas de cana-de-açúcar, café, citrus, eucalipto e pinus (MAPA, 2018). Possui como mecanismo de ação a inibição da biossíntese de celulose, tendo como principal sintoma a paralisação do crescimento e engrossamento das raízes, seguido de clorose e necrose da parte aérea nas plantas sensíveis (BRABHAM et al., 2014). O indaziflam é classificado como móvel a moderadamente móvel no solo (ALONSO et al., 2011; JHALA & SINGH, 2012).

Visando o estudo do comportamento de herbicidas no solo são utilizados métodos eficientes, dentre os quais destacam-se o biológico e o cromatográfico. O biológico permite detectar a presença do herbicida com o uso de espécies de plantas altamente sensíveis ao herbicida avaliado (BRAGA, 2017). Por outro lado, o cromatográfico é realizado por meio de um equipamento altamente sensível (CLAE), onde é possível quantificar a concentração do herbicida sorvido aos colóides do solo. Contudo, em alguns casos, o método biológico pode ser mais sensível em detectar baixas concentrações do herbicida no solo, com custo mais baixo (LANGARO, 2018).

Todavia, estudos relacionados sobre a interferência da precipitação pluvial na mobilidade do indaziflam em solos tropicais são ainda escassos. Sendo assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a lixiviação do indaziflam em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo - LVA, coletadas a campo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, submetidas a lâminas de 60 e 240 mm de precipitação pluvial, por meio do método biológico e cromatográfico.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Coletou-se amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) do município de Viçosa-MG (20°44'49.7" S, 42°50'33.5" W), nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade, as quais foram passadas em peneira com malha 4 mm. Posteriormente, foram coletadas subamostras dos solos de cada profundidade para caracterização quanto aos atributos físicos e químicos (Tabela 1), conforme Embrapa (1997).

**Tabela 1-** Caracterização química e física do Latossolo Vermelho-Amarelo coletado nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm de profundidade.

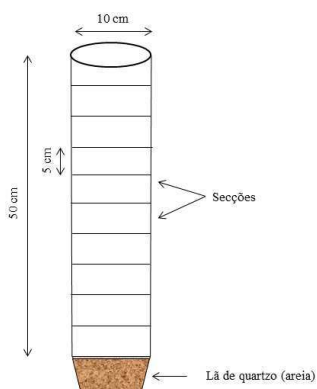
Análise química												
Solo	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m
	(H <sub>2</sub> O)	(mg dm <sup>-3</sup> )		------(Cmolc dm <sup>-3</sup> )-----							--(%)--	
LVA 0-20 cm	5,5	14,1	157	1,9	0,9	0,1	5,1	3,2	3,3	8,3	39	3
LVA 20-40 cm	4,8	2,6	69	0,5	0,2	1	5,1	0,9	1,9	6	15	53

Análise física					
Solo	Areia	Silte	Argila	Classe textural	MO
	------(%)-----				(dag kg <sup>-1</sup> )
LVA 0-20 cm	38	8	54	Argilo-arenosa	3,5
LVA 20-40 cm	46	8	46	Argila	2,4

Análises realizadas no Laboratório de Análises de Solo Viçosa, V: saturação de bases, SB- soma de bases; T: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica, P-rem: fósforo remanescente  
 \*Análises realizadas segundo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária- EMBRAPA, 1997.

### Montagem das colunas

Os solos foram acondicionados em colunas de PVC de 50 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro. As colunas foram parafinadas nas faces internas, a fim de evitar o escorrimento da água nas bordas. No fundo das colunas, foram colocados potes de polietileno preenchidos com areia, separada dos solos por uma membrana de microfibras para evitar a perda de solo (Figura 1).



**Figura 1-** Esquema da coluna de policloreto de vinila (PVC), previamente demarcada a cada 5 cm.

As colunas contendo os solos foram acondicionadas em recipientes com água, até o nível de 80 % da altura, por 48 horas, para saturação do solo, com umedecimento no sentido ascendente, expulsando as bolhas de ar. Após a saturação, as colunas foram retiradas do recipiente com água e mantidas em repouso, por 72 horas, para a drenagem do excesso de água até atingir valores de umidade próximos à capacidade de campo, para posterior aplicação do indaziflam.

### **Aplicação do herbicida**

Aplicou-se o indaziflam na dose de 100 g ha<sup>-1</sup> no topo das colunas. Para a aplicação utilizou-se um pulverizador costal pressurizado a CO<sub>2</sub>, equipado com barra com dois bicos TT 110.02, espaçados de 0,50 m, mantidos à pressão de 300 kPa, aplicando um volume de calda de 150 L ha<sup>-1</sup>. Além disso, contou-se também com uma testemunha sem aplicação de herbicida para cada amostra de solo.

### **Simulação das precipitações pluviais**

Decorridas 12:00 horas após a aplicação do herbicida, simulou-se duas lâminas de chuva, a primeira de 240 mm, aplicada de modo intermitente, sendo que a cada dois dias foi aplicada 60 mm de precipitação em um período de oito dias. A segunda consistiu de 60 mm em apenas uma aplicação, realizada simultaneamente com a última lâmina de 60 mm para o tratamento com precipitação de 240 mm.

Após a simulação da chuva, as colunas permaneceram na posição vertical por 72:00 horas e, em seguida, foram colocadas na posição horizontal e seccionadas a cada 5 cm de profundidade. O solo de cada secção foi colocado em bandejas de polietileno e homogeneizado, para posterior coleta de uma subamostra de 20,00 gramas, colocadas em sacos de polietileno e armazenadas em freezer à temperatura de -20 °C para posterior análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). O restante do solo de cada segmento da coluna foi destinado a confecção do bioensaio.

### **Bioensaio**

Utilizou-se vasos de polietileno com capacidade de 0,300 dm<sup>3</sup>, com fundos vedados. Posteriormente, foram semeadas cinco sementes de sorgo (*Sorghum bicolor*) por vaso como planta indicadora da presença ou não do indaziflam (BRAGA, 2017). Durante a condução do experimento foram realizadas irrigações

diárias de acordo com a necessidade de cada unidade experimental, assim como adubações com solução nutritiva composta de macro e micronutrientes, visando manter os níveis de nutrientes adequados.

Aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE) da espécie indicadora, foram realizadas avaliações visuais de intoxicação das plantas, atribuindo-se notas de 0 a 100, onde 0 representa ausência de sintomas de intoxicação e 100, morte da planta. Aos 21 DAE, as plantas foram cortadas rentes ao solo, onde a parte aérea foi acondicionada em sacos de papel e colocadas em estufa 65°C ( $\pm 2$ ) até atingir massa constante, para determinação do acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA).

### **Método cromatográfico**

As amostras previamente coletadas nos segmentos das colunas e armazenadas em freezer foram descongeladas e homogeneizadas, visando à detecção e quantificação do indaziflam por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Utilizou-se o método de extração sólido-líquido com partição em baixa temperatura (ESL-PBT) de acordo com a metodologia proposta por RAMIREZ et al. (2018). Pesou-se 4,000 g de cada amostra, em tubos falcon com capacidade de 50,00 mL. Posteriormente, foi adicionado aos tubos 14,00 mL da solução extratora, contendo 8,00 mL de acetonitrila, 4,10 mL de água milli-q e 1,90 mL de acetato de etila. Em seguida, os tubos foram agitados em vortex, por 2,0 minutos, para homogeneização da solução, posteriormente os tubos foram acondicionados em freezer à temperatura de -20 °C por 4:00 horas.

Após o período de repouso no freezer, realizou-se a filtração da fração não congelada, contendo extrato orgânico (solventes + herbicida) em filtros de papel, para balões de fundo redondo com capacidade de 50,0 mL, sendo adicionados 2,00 g de sulfato de sódio anidro, para retirar moléculas de água, segundo recomendações da OECD (2000). Em seguida, os balões foram levados ao evaporador rotativo (80 rpm a 50°C), para evaporação dos solventes, permanecendo somente o indaziflam no recipiente. Em seguida, este conteúdo foi lavado com três alíquotas de 0,50 mL de acetonitrila e filtrado em filtro millipore com membrana PTFE de 0,45  $\mu$ m diretamente para “vials” com capacidade de 1,50 mL, para análise por cromatografia de alta eficiência (CLAE).

A concentração de cada herbicida em solução foi determinada por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), modelo Shimadzu LC 20AT,

detector UV/vis (Schimadzu SPD-20A). A coluna analítica utilizada foi uma coluna C18 de aço inox (Shimadzu VP-ODS Shim-pack 150 × 4.6 mm I. D., 4.6 μm ODS). As condições cromatográficas foram: fase móvel composta por acetonitrila e água acidificada com ácido acético a 0,01%, na proporção 60:40 (v/v); fluxo de 1,0 mL min<sup>-1</sup>; volume de injeção de 20 μL; comprimento de onda de 210 nm. O tempo de retenção do indaziflam nessas condições foi de aproximadamente 4,6 minutos. A quantificação foi realizada por meio da comparação das áreas obtidas nos cromatogramas para cada ensaio pelo método de calibração externa, já a identificação, foi realizada pelo tempo de retenção, utilizando-se um padrão analítico do indaziflam com 99,9 % de grau de pureza, e por fim, o método de extração do indaziflam foi validado considerando os parâmetros de desempenho analítico de acordo com as recomendações do INMETRO (2010) e ANVISA (2003).

### **Análise dos dados**

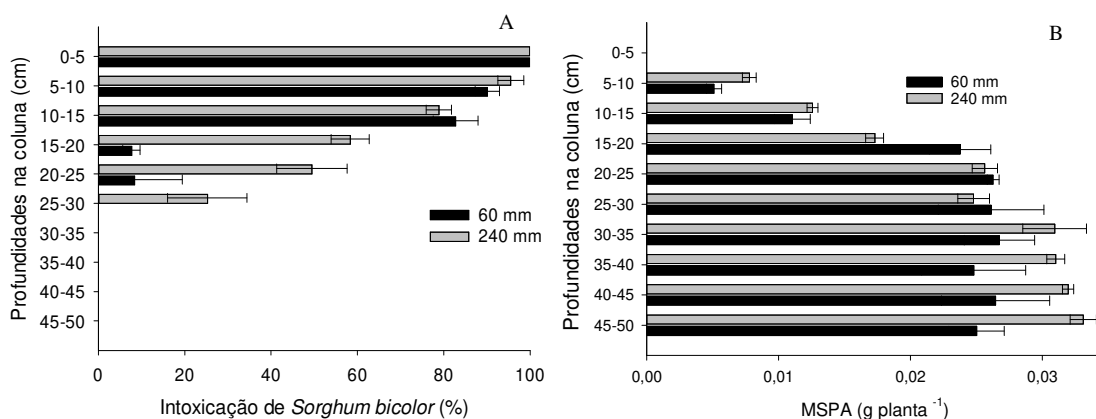
Para interpretação dos resultados, os dados referentes à intoxicação e acúmulo de matéria seca do sorgo, no bioensaio e à concentração do indaziflam obtida por CLAE, foram plotados em gráficos de barras, onde as profundidades nas colunas foram representadas no eixo “Y” e as concentrações do herbicida no eixo “X”, sendo as médias de cada profundidade nas colunas, dentro de cada solo, comparadas pelo desvio padrão.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A maior porcentagem de intoxicação das plantas de sorgo, no LVA coletado na camada de 0-20 cm, nas duas intensidades de precipitação pluvial (60 e 240 mm) foi constatada nos primeiros 5,0 cm de profundidade na coluna, que resultou na morte das plantas. Conseqüentemente, não ocorreu acúmulo de matéria seca (Figuras 2A e 2B), indicando maior concentração do indaziflam na camada superficial do solo.

Ainda para o LVA coletado na camada de 0-20 cm, verificou-se que à medida que se aumentou a profundidade nas colunas, houve redução no nível de intoxicação nas plantas indicadoras e, conseqüentemente, redução nos danos causados no crescimento destas (Figuras 2A e 2B). No entanto, verificou-se diferenças para as intensidades de precipitação nas profundidades de 15-20, 20-25 e 25-30 cm das

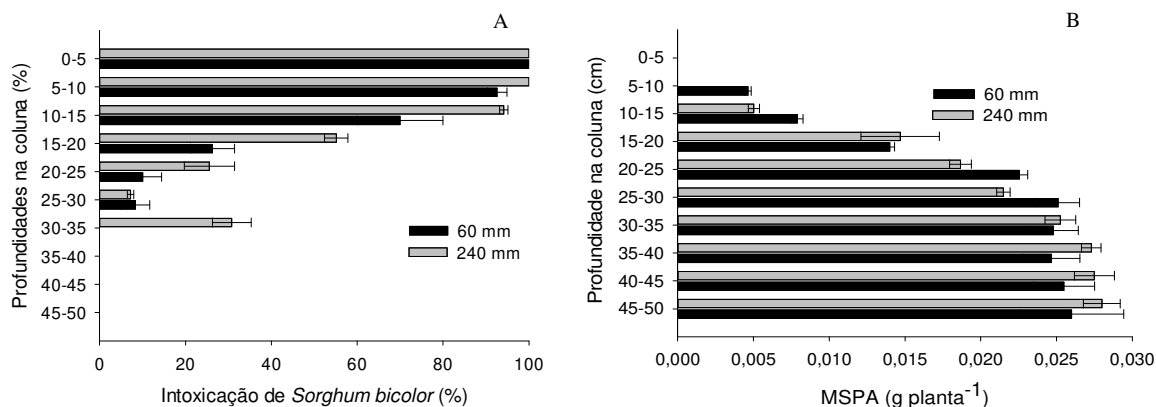
colunas Neste caso, a maior lâmina de água aplicada resultou em maior deslocamento do herbicida no perfil do solo, ocasionando maior intoxicação nas plantas de sorgo, as quais detectaram a presença do indaziflam até 25 e 30 cm de profundidade nas precipitações pluviais simuladas de 60 e 240 mm, respectivamente.



**Figura 2** - Intoxicação (A) e acúmulo de matéria seca da parte aérea - MSPA (B) de plantas de *Sorghum bicolor* aos 21 DAE em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletado na camada 0-20 cm submetido à simulação de precipitação pluvial de 60 e 240 mm.

No LVA coletado na camada de 20-40 cm, constatou-se, por meio do ensaio biológico, maiores níveis de concentração do indaziflam, que resultaram em morte das plantas de sorgo nas profundidades de 0-5 cm e 0-10 cm das colunas para as lâminas de 60 e 240 mm, respectivamente (Figuras 3A e 3B). Assim como observado para o solo coletado na camada 0-20 cm (Figuras 2A e 2B), o aumento da lâmina de água aplicada de 60 para 240 mm resultou em maior transporte do herbicida no perfil do solo. Consequentemente, maiores índices de intoxicação nas plantas de sorgo, confirmando a presença do indaziflam até 30 e 35 cm de profundidade, respectivamente (Figuras 3A e 3B).

Apesar da diferença de apenas 5,0 cm na mobilidade do herbicida detectada quando se aplicou a lâmina de 240 mm em relação à de 60 mm, no LVA coletado em campo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, percebeu-se que níveis mais elevados de intoxicação, indicam maior transporte do herbicida no perfil do solo para camadas inferiores. Desta forma, pode-se inferir sobre a relação direta entre intensidade de lixiviação do herbicida e precipitação acumulada durante seu período residual.



**Figura 3** - Intoxicação (A) e acúmulo de matéria seca da parte aérea - MSPA (B) de plantas de *Sorghum bicolor* aos 21 dias após a emergência nas diferentes profundidades da coluna em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletado na camada 20-40 cm submetido à simulação de precipitação pluvial de 60 e 240 mm.

Resultados deste trabalho corroboram com os de JHALA et al. (2012) que também constataram por meio de ensaios biológicos com plantas de azevém (*Lolium perene*), sintomas de intoxicação pelo indaziflam até 30 cm de profundidade nas colunas, com lâmina de 150 mm de precipitação e dose de 150 g ha<sup>-1</sup> de indaziflam.

A baixa diferença na mobilidade do herbicida quando se aplicou a lâmina de 240 mm em relação à de 60 mm, se deve à baixa solubilidade (0,0028 kg m<sup>-3</sup> a 20 °C), do mesmo em água, limitando seu transporte. Enquanto que herbicidas com maior solubilidade em água estão mais propensos a se deslocarem no perfil do solo, atingindo camadas mais profundas, podendo inclusive causar danos ambientais, com contaminação de águas subterrâneas (OLIVEIRA JÚNIOR & REGITANO, 2009; GUERRA et al., 2016). No entanto, mesmo com elevada solubilidade, somente haverá transporte do herbicida no perfil do solo se este estiver disponível na solução, ou seja, herbicidas com baixo índice de sorção estão mais propensos a serem lixiviados (MONQUERO et al., 2014; GONÇALVES, 2018). Portanto, o transporte do indaziflam no perfil do solo até 35 cm de profundidade, mesmo com sua baixa solubilidade, é devido a baixa sorção do mesmo ao LVA. GONÇALVES (2018) também constatou baixos índices de sorção do indaziflam em LVA com características químicas e físicas semelhantes aos avaliados neste trabalho.

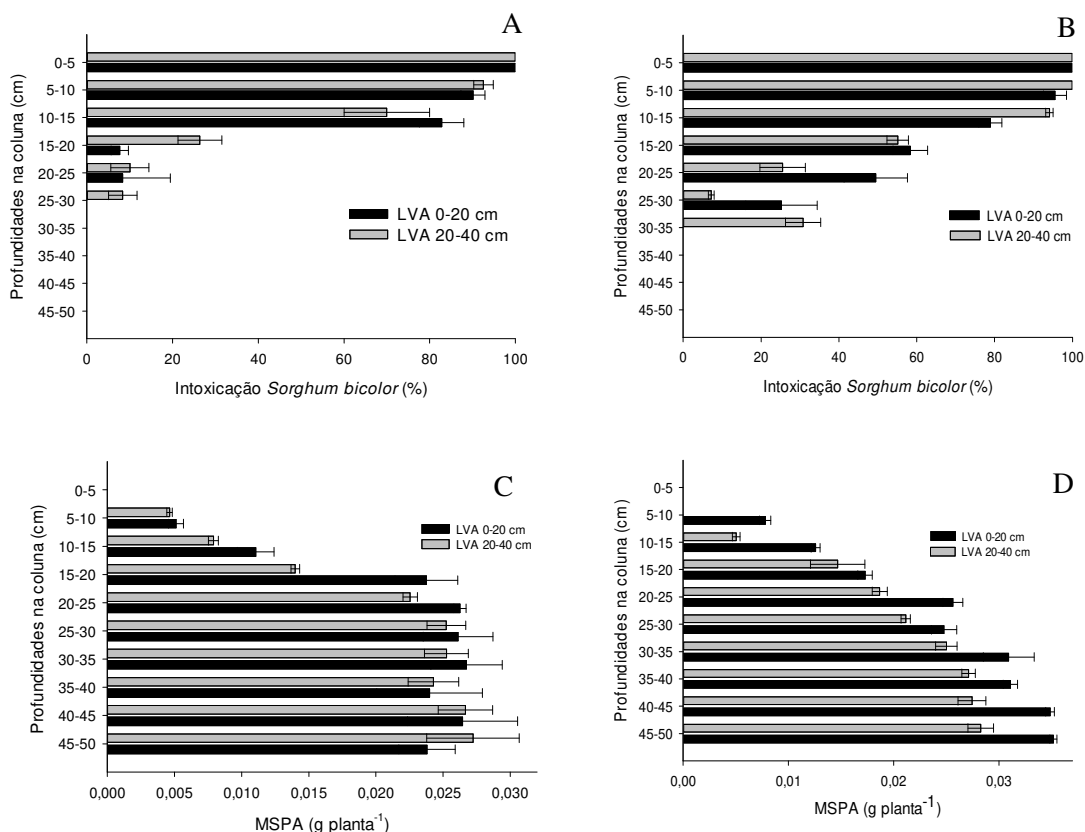
A capacidade sortiva de um herbicida no solo influencia na intensidade da lixiviação, de modo que a sorção dos herbicidas, especialmente, os aplicados em pré-emergência, não deve ser muito elevada para que o mesmo possa ser levado até os primeiros 10 cm de solo. Aonde irá exercer seu efeito sobre sementes e/ou plântulas durante a germinação ou emergência (MONQUERO et al., 2014). Todavia, a sorção é o principal processo que atua impedindo que ocorra a lixiviação em excesso, o que acarretaria redução da eficácia pela percolação do produto no perfil do solo, além de possibilitar a contaminação do lençol freático (MONQUERO et al., 2014; BRAGA et al., 2015).

Quando se aplicou a lâmina de 240 mm, a MSPA das plantas de sorgo aumentou a partir da profundidade de 30 cm, em relação à testemunha, em ambos os solos (Figuras 4C e 4B). Este fato pode ser explicado por um possível efeito de “ormese”, onde concentrações do herbicida extremamente baixas podem favorecer o desenvolvimento da planta, visto que essas, de alguma forma, conseguem utilizar a molécula como substrato para o seu metabolismo, favorecendo o seu desenvolvimento. COSTA (2018), avaliando o efeito do indaziflam em plantas de macaúba, constatou que as plantas obtiveram ganho de matéria seca, quando comparadas a testemunha sem aplicação do herbicida, ao realizar o transplântio das mudas para recipientes maiores, sujeitadas a aplicação do indaziflam. Ademais a intensidade da precipitação pluvial pode aumentar à diluição da concentração de uma molécula no perfil do solo, fazendo com que este herbicida cause menor dano as plantas sensíveis (LAW, 2011).

Ao se comparar o potencial de lixiviação do indaziflam, por meio do ensaio biológico nos solos coletados nas camadas de 0-20 e 20-40 cm dentro de cada lâmina de precipitação aplicada (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D), constatou-se maior mobilidade do herbicida no solo da camada mais profunda (20-40 cm). Por outro lado, no solo coletado até 20 cm, o indaziflam foi detectado até 25 e 30 cm, nas respectivas lâminas de água aplicadas (60 e 240 mm). Esse fato pode ser explicado devido ao maior teor de matéria orgânica na camada 0-20 cm em relação ao da camada de 20-40 cm (Tabela 1), promovendo maior sorção do herbicida, diminuindo sua concentração na solução do solo, tornando-o menos disponível a lixiviação.

Maior mobilidade do indaziflam em solos com menores teores de matéria orgânica também foi constatada por JHALA et al. (2012) e GONÇALVES (2018), em razão da maior sorção do indaziflam em solos com maior teor de matéria

orgânica (BRAGA, 2017). Segundo SILVA et al. (2014) a matéria orgânica do solo desempenha papel fundamental quando se trata de substâncias com potencial de contaminação ambiental, como os herbicidas, pois, aumenta a sorção e limita a sua movimentação no perfil do solo.



**Figura 4** - Intoxicação e acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de sorgo na coluna para o Latossolo vermelho-Amarelo coletado nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade submetido à aplicação de lâminas de precipitação de 60 mm (A, C) e 240 mm (B, D), após a aplicação do indaziflam (100 g ha<sup>-1</sup>).

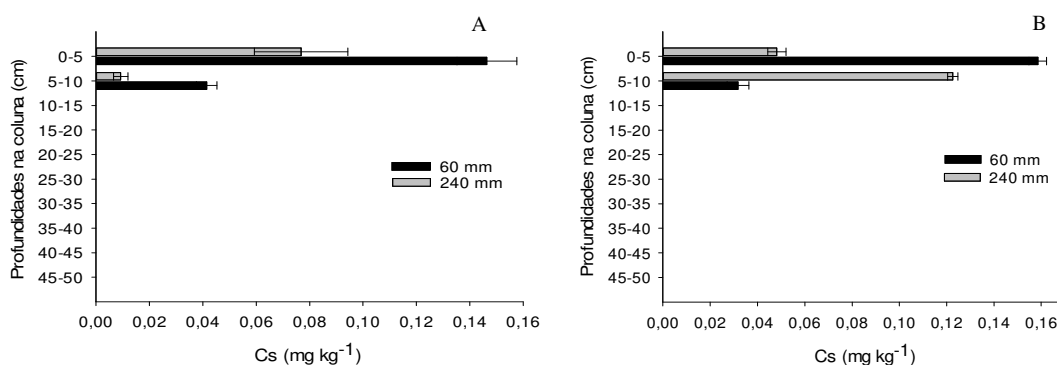
Além do menor teor de matéria orgânica, a amostra do LVA coletado na camada de 20-40 cm é mais arenosa que a da camada 0-20 cm (Tabela 1). Segundo CASTRO NETO et al. (2018) e SOUZA (2017) maiores teores de areia na composição física de um solo favorecem a percolação de água no perfil e, conseqüentemente, maior movimento do herbicida por fluxo de massa. Contudo, GUERRA et al. (2016) verificaram que a mobilidade do indaziflam não diferiu em solos de texturas diferentes, atribuindo esse fato a baixa solubilidade do herbicida.

Outro atributo do solo que exerce efeito importante sobre a sorção e potencial de lixiviação do indaziflam é o pH, pois, com a elevação deste ocorre redução da capacidade sorbiva do herbicida, favorecendo a lixiviação (GONÇALVES, 2018). Isto ocorre devido à constante de dissociação ácida (pKa) do indaziflam ser de 3,5 (TOMPKINS et al., 2010). Pois em solos com valores de pH acima do valor do pKa, o herbicida tende a estar em maior concentração na forma dissociada (aniônica) (TOMPKINS et al., 2010). Dessa forma, com o aumento do pH o indaziflam tende a ser repelido pelas cargas negativas do solo, permanecendo em maior concentração na solução do meio, aumentando seu risco de percolação no perfil (SILVA et al., 2007).

No entanto, nas amostras de solo utilizadas nesse estudo, o maior valor de pH na camada 0-20 cm (pH =5,5) em relação ao solo da camada 20-40 cm (pH=4,8), demonstrou que o pH do solo não deve ser usado como principal característica para explicação da mobilidade do indaziflam. Foi observado neste estudo que maiores teores de matéria orgânica presentes na camada superficial das amostras do LVA (Tabela 1) exerceram maior influência na retenção do indaziflam em comparação ao pH do solo. GONÇALVES (2018) avaliando a variação do pH sobre a sorção do indaziflam em dois solos, constatou que a elevação do pH dos solos de 4,5 para 5,5, resultaram em redução do coeficiente de sorção (Kf). Todavia, mesmo com a elevação do pH para 5,5, o Kf do solo com maior teor de matéria orgânica manteve-se acima do solo com menor teor de matéria orgânica, com pH 4,5. Estes resultados corroboram os obtidos neste trabalho. Segundo SILVA et al. (2012) o teor de matéria orgânica pode, em alguns casos, ser considerado o principal atributo relacionado com a sorção de herbicidas em solos tropicais.

O indaziflam foi quantificado por meio da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), somente até 10 cm de profundidade, independente da camada de solo coletada em campo (0-20 e 20 -40 cm) e da intensidade da lâmina de precipitação pluvial (Figuras 5A e 5B). No LVA coletado na camada de 0-20 cm, o herbicida teve uma maior concentração na camada de 5-10 cm, independente da lâmina aplicada. No entanto, quando se aplicou a lâmina de 60 mm de chuva detectou-se maior concentração do herbicida em relação à precipitação de 240 mm (Figura 5A), que se deve ao maior arraste da molécula do indaziflam pela água para profundidades maiores, conforme observado na camada de 5-10 cm, onde maior concentração do indaziflam foi detectada quando se aplicou a maior lâmina de chuva.

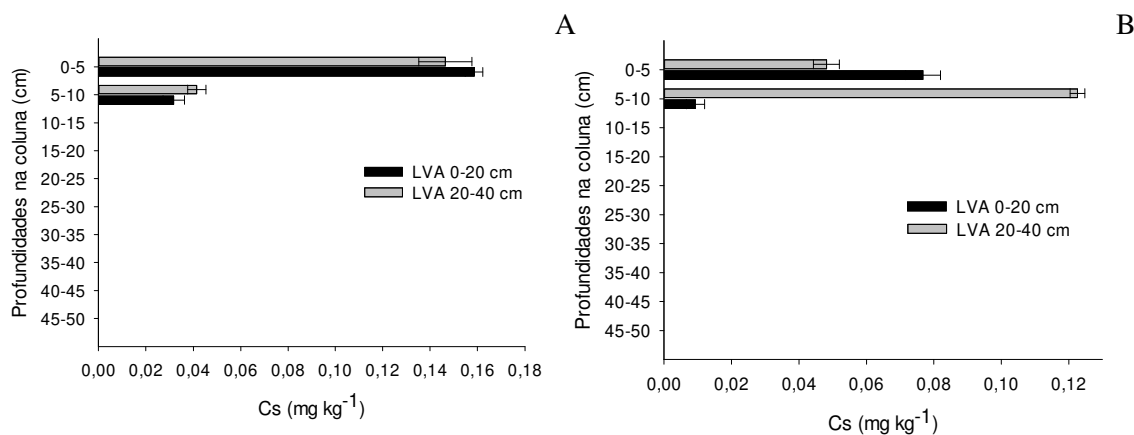
Para o LVA coletado na camada de 20-40 cm houve comportamento semelhante da lâmina de 60 mm em relação ao solo da camada de 0-20 cm. Contudo, com a aplicação da lâmina de 240 mm, ocorreu uma inversão, com maior concentração do herbicida detectada no segmento de 5 a 10 cm da coluna (Figura 3B), evidenciando o efeito da quantidade de chuva durante o período residual do herbicida sobre o seu potencial de lixiviação.



**Figura 5 - Concentração do indaziflam (Cs) no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), coletadas na camada de 0-20 cm (A) e 20- 40 cm (B), submetidas a simulação de chuvas de 60 e 240 mm.**

STEFFENS et al. (2013) observaram que as condições climáticas, principalmente variação na temperatura e chuvas, influencia diretamente no volume de herbicidas lixiviados, sendo que em épocas chuvosas, a percolação aumentou em mais de 30 %, quando comparadas a épocas secas.

A lâmina de chuva de 240 mm resultou em diferenças entre os solos, com o LVA da camada 0-20 cm mantendo maior concentração do indaziflam na camada de 0-5 cm da coluna. Já no solo coletado em campo na profundidade de 20-40 cm, houve maior percolação do herbicida, com maior concentração detectada na camada 5-10 cm. Isto pode ser devido ao menor teor de matéria orgânica neste solo, promovendo menor retenção do herbicida, associado à textura mais arenosa (Tabela 1), a qual influenciou a percolação das moléculas no perfil do solo, conforme discutido anteriormente no ensaio biológico.



**Figura 6** - Concentração de indaziflam (Cs) em Latossolo Vermelho-Amarelo coletado nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade submetida à aplicação de lâminas de precipitação de 60 mm (A) e 240 mm (B).

Os herbicidas, uma vez percolados das camadas superficiais, podem ter sua persistência no ambiente intensamente prolongada, visto que em camadas mais profundas do solo, o teor de matéria orgânica é menor, além da população de microrganismos, responsáveis pela degradação e descontaminação, serem menores (SARMAH et al., 1998; PRATA et al., 2001). Os microrganismos do solo, especialmente bactérias e fungos, atuam de forma ativa e significativa na degradação de xenobióticos, influenciando na persistência dessas moléculas no ambiente (SINGH & SINGH, 2016). Todavia, é necessário que as condições do meio sejam favoráveis para que esse fenômeno ocorra. Os microrganismos utilizam a molécula do herbicida como fonte de carbono e nitrogênio, alterando a estrutura da molécula, tornando-a menos prejudicial ao ambiente (LEONEL et al., 2010). Contudo, fatores como oxigênio, luz e matéria orgânica, são cruciais para que estes microrganismos exerçam sua ação de degradação. Sabe-se também que em maiores profundidades no perfil do solo estas condições são limitantes, podendo o herbicida permanecer por longos períodos.

Ressalta-se que o indaziflam apresenta meia vida maior que 150 dias (TOMPKINS, 2010). Tal fato pode fazer com a persistência deste herbicida seja ainda mais prolongada em camadas subsuperficiais, aumentando o risco de contaminação.

O método da planta indicadora (bioensaio) detectou a presença do indaziflam em maiores profundidades da coluna, mostrando-se mais eficiente na detecção do

herbicida, embora, não possibilite a determinação da concentração do mesmo. Por outro lado, a CLAE apresentou menor sensibilidade na detecção em maiores profundidades devido ao limite de detecção da solução extraída do solo, em razão da baixa dose aplicada do herbicida ( $100 \text{ g ha}^{-1}$ ). Este fato pode ter dificultado sua detecção e, ao mesmo tempo, indicando uma alta sensibilidade da planta indicadora, associando-se ao fato de que este herbicida apresenta baixa sorção nos solos (ALONSO et al., 2011). Isso fez com que o herbicida estivesse mais concentrado na solução do solo, facilitando a detecção por bioensaios. Todavia deve-se destacar que, a CLAE apresenta uma importante vantagem que é quantificar a concentração do herbicida ao longo da coluna de solo (SILVA et al., 2012; BRAGA et al., 2016). Deste modo, torna-se importante aliar a maior sensibilidade de detecção por meio da planta indicadora, à capacidade de quantificação da substância pela CLAE, conforme relatado por BRAGA et al. (2016).

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. Deste modo, não houve a necessidade de se usarem laboratórios sofisticados além 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).

## **CONCLUSÕES**

A intensidade da precipitação pluvial influenciou diretamente o potencial de lixiviação do indaziflam.

O indaziflam está mais propenso a ser lixiviado na camada de 20-40 cm do Latossolo Vermelho-Amarelo, devido ao menor teor de matéria orgânica.

O método biológico mostrou-se mais sensível em relação ao método cromatográfico na detecção do indaziflam em solos.

## REFERÊNCIAS

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

ASLAM, S., IQBAL, A., DESCHAMPS, M., RECOUS, S., GARNIER, P., & BENOIT, P. Effect of rainfall regimes and mulch decomposition on the dissipation and leaching of S-metolachlor and glyphosate: a soil column experiment. **Pest management science**, v. 71, n. 2, p. 278-291, 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. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

CARDUCCI, C. E., OLIVEIRA, G. C. D., ZEVIANI, W. M., LIMA, V. M., & SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.

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.

CHRISTOFFOLETI, P. J., LÓPEZ-OVEJERO, R. F., DAMIN, V., CARVALHO, S. J. P., & NICOLAI, M.. Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, 2009.

COSTA Y. K. S. Herbicidas: seletividade para mudas de macaúba e eficácia no controle de plantas daninhas. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

FENOLL, J., GARRIDO, I., HELLÍN, P., FLORES, P., VELA, N., & NAVARRO, S. Use of different organic wastes as strategy to mitigate the leaching potential of phenylurea herbicides through the soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 6, p. 4336-4349, 2015.

FONTES, M. P. F., CAMARGO, O. D., & SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001.

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.

GONÇALVES, V. A. **Sorção, dessorção, meia-vida e lixiviação do tebuthiuron em latossolos brasileiros**. 2018. 65f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

GUERRA, N., OLIVEIRA JR, R. S., CONSTANTIN, J., OLIVEIRA NETO, A. M., PUTON, G., & GARRIDO, T. H. P. Influence of precipitation and sugarcane straw in aminocyclopyrachlor and indaziflam control efficiency. **Planta Daninha**, v. 33, n. 3, p. 535-542, 2015.

GUERRA, N., OLIVEIRA JUNIOR, R. S., CONSTANTIN, J., OLIVEIRA NETO, A. M., GEMELLI, A., PEREIRA JUNIOR, D. M., & GUERRA, A. Persistence of Biological Activity and Leaching Potential of Herbicides Aminocyclopyrachlor and Indaziflam in Soils with Different Textures<sup>1</sup>. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 345-356, 2016.

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.

GUSTAFSON, D. I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 8, n. 4, p. 339-357, 1989.

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

KAWAMOTO, K.; URANO, K. Parameters for predicting fate of organochlorine pesticides in the environment (I) octanol-water and air-water partition coefficients. **Chemosphere**, v. 18, n. 9-10, p. 1987-1996, 1989.

LANGARO, A. C. **Sorção e lixiviação do Sulfentrazone em Latossolo Vermelho-Amarelo aplicado de forma isolada e em mistura com formulações de Glyphosate**. 2018. 95f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

LAW, S. E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during de 20th century. **Journal Electrostatic**, v. 51, n. 2, p. 25-42, 2001.

LEONEL, L. V.; NASCIMENTO, E. G. do; BERTOZZI, J.; BÔAS, L. A. V.; BÔAS, G. T. V. Biorremediação do solo. **Terra e Cultura**, n. 51, ano 26, Julho a Dezembro de 2010.

LOOS, R., WOLLGAST, J., HUBER, T., & HANKE, G. Polar herbicides, pharmaceutical products, perfluorooctanesulfonate (PFOS), perfluorooctanoate (PFOA), and nonylphenol and its carboxylates and ethoxylates in surface and tap waters around Lake Maggiore in Northern Italy. **Analytical and bioanalytical chemistry**, v. 387, n. 4, p. 1469-1478, 2007.

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.

Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA), AGROFIT (2003). Link: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons)  
Acessado em 16/05/2018.

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.

NETO, M. D. D. C., SOUZA, M. D. F., SILVA, D. V., FARIA, A. T., DA SILVA, A. A., PEREIRA, G. A. M., & DE FREITAS, M. A. M. Leaching of imidazolinones in soils under a clearfield system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 7, p. 897-906, 2017.

OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. Guidelines for testing of chemicals: adsorption-desorption using a batch equilibrium method, 106. **OECD, Paris, France**, 44p, 2000.

OLIVEIRA JR. R. S., REGITANO J. B. Dinâmica de pesticidas no solo. In: Melo V.F., Alleoni L.R.F. Química e mineralogia do solo. Minas Gerais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. p.187-248, 2009.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)**, 2011.

PFEUFFER, R. J., & RAND, G. M. South Florida ambient pesticide monitoring program. **Ecotoxicology**, v. 13, n. 3, p. 195-205, 2004.

QUEIROZ, G. M. P., SILVA, M. D., BIANCO, R. J. F., PINHEIRO, A., & KAUFMANN, V. Transporte de glifosato pelo escoamento superficial e por lixiviação em um solo agrícola. **Química Nova**, v. 34, n. 2, p. 190-195, 2011.

RAMIREZ, A. C. R., TEIXEIRA, M. F., NEVES, A. A., QUEIROZ, M. E. L., DA SILVA, A. A., FURTADO, I. F., & DE 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**, v. 21, n. 3, p. 1-8, 2018.

RIBEIRO, M. L., LOURENCETTI, C., PEREIRA, S. Y., & MARCHI, M. R. R. D. Groundwater contamination by pesticides: preliminary evaluation. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 688-694, 2007.

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.

SASSINE, L.; LA SALLE, C. L. G.; KHASKA, M.; VERDOUX, P.; MEFFRE, P.; BENFODDA, Z.; ROIG, B. Spatial distribution of triazine residues in a shallow alluvial aquifer linked to groundwater residence time. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 8, p. 6878-6888, 2017.

SCHOLZ-STARKE, B.; BO, L.; HOLBACH, A.; NORRA, S.; FLOEHR, T.; HOLLERT, H.; OTTERMANN, R. Simulation-based assessment of the impact of fertiliser and herbicide application on freshwater ecosystems at the Three Gorges Reservoir in China. **Science of The Total Environment**, v. 639, p. 286-303, 2018.

SILVA, A. A. da; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, VIVIAN R.; OLIVEIRA Jr. R. S. Herbicidas: Comportamento no solo. **Tópicos em manejo de plantas daninhas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa**, v. 2, p. 58-117, 2007.

SILVA, D. R. O. D., AVILA, L. A. D., AGOSTINETTO, D., BUNDT, A. D. C., PRIMEL, E. G., & CALDAS, S. S. Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavouras de arroz irrigado. **Química Nova**, V. 34, N. 5, 748-752, 2011.

SILVA, G. R., D'ANTONINO, L., FAUSTINO, L. A., SILVA, A. A., FERREIRA, F. A., & TEXEIRA, C. C. Sorption of fomesafen in Brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 31, n. 4, p. 971-977, 2013.

SILVA, K. S. **Lixiviação e persistência de ametryn em solos da região canavieira do nordeste brasileiro**. 2016. Tese (Doutorado em fitotecnia) Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2016.

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.

SINGH, B; SINGH, K. Microbial degradation of herbicides. **Critical reviews in microbiology**, v. 42, n. 2, p. 245-261, 2016.

SOUZA, M. F. **Dinâmica do atrazine em aplicações isoladas e em misturas com formulações de glyphosate** 2017. 656f. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

STEFFENS, K., LARSBO, M., MOEYS, J., JARVIS, N., & LEWAN, E. Predicting pesticide leaching under climate change: Importance of model structure and parameter uncertainty. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 172, p. 24-34, 2013.

TOMPKINS, J. 2010. **Pesticide Fact Sheet: Indaziflam**. Environmental Protection Agency. Unites States. Disponível em: <[http://www.epa.gov/opp00001/chem\\_search/reg\\_actions/registration/fs\\_PC-80818\\_26-Jul-10.pdf](http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-80818_26-Jul-10.pdf)> Acessado em: 04 de abril de 2017.

U.S.EPA. **Pesticide fact sheet for indaziflam**.2011.Disponível em: [https://www3.epa.gov/pesticides/chem\\_search/ppls/000432-01523-20140507.pdf](https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/000432-01523-20140507.pdf). Acesso em: 16/05/2018.

WEISSINGER, R. H.; BLACKWELL, B. R.; KETELES, K.; BATTAGLIN, W. A.; BRADLEY, P. M. Bioactive contaminants of emerging concern in National Park waters of the northern Colorado Plateau, USA. **Science of The Total Environment**, v. 636, p. 910-918, 2018.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento de herbicidas em solos permite compreender e entender a dinâmica desses no ambiente, buscando uma aplicação segura do ponto de vista técnico e ambiental. Neste trabalho foi avaliada a sorção, dessorção e lixiviação do indaziflam em diferentes amostras de solos, por meio de ensaios biológicos e cromatográficos. Observou-se que o indaziflam possui baixa sorção nos solos estudados, sendo que esta sorção é maior em solos com maiores teores de matéria orgânica, sendo este o atributo do solo que mais se correlacionou com os valores dos coeficientes de sorção.

Nos solos em que ocorreu maior sorção, houve também maior dessorção, o que indica a facilidade desse herbicida retornar a solução do solo. Além disso, verificou-se que em camadas mais profundas nos solos a sorção do indaziflam foi menor quando comparada a camadas superficiais. Este fato pode prolongar a persistência desse herbicida no ambiente, uma vez que em camadas mais profundas a população de microrganismos é menor, sendo estes os responsáveis pela maior parte da degradação de herbicidas em solos.

A intensidade de precipitação fluvial influenciou no potencial de mobilidade do indaziflam nos solos, onde, maior precipitação pluvial, promoveu maior arraste da molécula do herbicida, sendo este carregado a maiores profundidades nos solos. Para o ensaio de lixiviação, o método biológico mostrou-se mais eficiente na detecção do indaziflam nos solos em relação ao cromatográfico. Dessa forma, este método pode ser utilizado, sendo mais barato, de fácil utilização e confiável.

Contudo, devido à baixa sorção do indaziflam nos solos estudados e as mudanças na sua dinâmica no ambiente em resposta as condições edafoclimáticas do local de aplicação, torna-se necessário entender como este herbicida interage com os diversos constituintes de um determinado ecossistema, visando recomendações seguras, tendo em vista que o seu comportamento no ambiente é complexo, podendo este, perder eficiência no controle das plantas daninhas e causar contaminação ambiental, sobretudo de corpos de águas subterrâneas e superficiais.