

MANOEL DELINTRO DE CASTRO NETO

**SORÇÃO, LIXIVIAÇÃO E PERSISTÊNCIA DE IMIDAZOLINONAS EM
SOLOS UTILIZADOS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO DE ARROZ**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL
2014

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

T

C346s
2014
Castro Neto, Manoel Delintro de, 1978-
Sorção, lixiviação e persistência de imidazolinonas em
solos utilizados no sistema clearfield de cultivo de arroz /
Manoel Delintro de Castro Neto. – Viçosa, MG, 2014.
ix, 65f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Francisco Affonso Ferreira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Plantas e solo. 2. Arroz - Solos. 3. Física do solo.
4. Química do solo. 5. Herbicidas. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-graduação
em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

MANOEL DELINTRO DE CASTRO NETO

**SORÇÃO, LIXIVIAÇÃO E PERSISTÊNCIA DE IMIDAZOLINONAS EM
SOLOS UTILIZADOS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO DE
ARROZ**

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

APROVADA: 18 de dezembro de 2014.



Evander Alves Ferreira



Maria Aparecida Nogueira Sedyama



Leonardo d'Antonino



Moacil Alves de Souza



Antonio Alberto da Silva
(Presidente)

*Aos meus pais, Otaviano (in memoriam) e Ana,
pessoas humildes que, diante de todos os obstáculos,
mostraram-se dignos e firmes nas suas decisões, mas
tendo sempre uma palavra de carinho e conforto.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realização deste curso.

À Universidade Federal de Tocantins (UFT), pela oportunidade de realização dessa complementação de minha formação profissional e pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Aos professores Francisco Affonso Ferreira e Antonio Alberto da Silva, pela orientação segura, pelos ensinamentos, pela paciência e amizade.

Aos professores Evander Alves Ferreira, Leonardo D'Antonino, Maria Aparecida Nogueira Sedyama e Moacil Alves de Souza, pelos conselhos, pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao técnico Luís Henrique Lopes de Freitas, do Laboratório de Herbicidas, pelo apoio e pelas sugestões na instalação e condução dos experimentos.

À minha mãe Ana Pereira, sem a qual não seria possível estar aqui.

À minha esposa Maria e às minhas filhas Danielly e Helena, pelo apoio e carinho, e a toda minha família.

A todos os amigos e colegas do Laboratório de Herbicidas, pela amizade, pela disponibilidade e pelos aconselhamentos, os quais contribuíram diretamente no desenvolvimento deste trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

BIOGRAFIA

MANOEL DELINTRO DE CASTRO NETO, filho de Otaviano de Castro Primo e Ana Pereira de Castro, nasceu em 1º de agosto de 1978, no município de Gurupi, Tocantins-TO.

Em dezembro de 1997, formou-se Técnico em Agropecuária pelo Colégio Agropecuário de Natividade, Natividade - TO.

Em dezembro de 2006, graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitario de Gurupi, Gurupi-TO.

Em agosto de 2007, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção vegetal na Universidade Federal de Tocantins, concluindo-o em junho de 2009. Em agosto de 2010, ingressou no Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 18 de dezembro de 2014.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA	5
SORÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADAS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO ARROZ	7
RESUMO	7
ABSTRACT	8
INTRODUÇÃO	8
MATERIAL E MÉTODOS	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
LITERATURA CITADA	21
LIXIVIAÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADAS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO ARROZ	25
RESUMO	25
ABSTRACT	26
INTRODUÇÃO	26
MATERIAL E MÉTODOS	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
Plintossolo Háptico (FX)	30
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)	34
Gleissolo Háptico (GX)	39
LITERATURA CITADA	42

PERSISTÊNCIA DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADOS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO DE ARROZ	45
RESUMO	45
ABSTRACT	46
INTRODUÇÃO.....	46
MATERIAL E MÉTODOS	48
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
Plintossolo Háplico (FX)	50
Latosolo Vermelho-Amarelo (LVA)	54
Gleissolo Háplico (GX).....	57
LITERATURA CITADA.....	61
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65

RESUMO

CASTRO NETO, Manoel Delintro de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Sorção, lixiviação e persistência de imidazolinonas em solos utilizados no sistema clearfield de cultivo de arroz.** Orientador: Francisco Affonso Ferreira. Coorientadores: Antonio Alberto da Silva e Paulo Roberto Cecon.

A contaminação do solo e de águas com herbicidas tem gerado grande preocupação ambiental. Esta preocupação é ainda maior quando se utiliza estes compostos em áreas de várzeas irrigadas na cultura do arroz. Neste trabalho foram realizados estudos sobre o comportamento dos herbicidas imazethapyr e imazapic muito utilizados na cultura do arroz em todo o Brasil. Foram realizados três experimentos para avaliar a sorção, lixiviação e persistência do imazethapyr e imazapic aplicados em mistura e de forma isoladas em três solos proviniets do estado de Tocantins (Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)), com diferentes características físicas e químicas, utilizados para o cultivo do arroz e outras culturas anuais. Para determinação da sorção, lixiviação e persistência dos herbicidas nos solos foram utilizados ensaios biológicos. Constatou-se que a sorção, a lixiviação e a persistência de imazethapyr e imazapic em mistura e isolados, são influenciadas pelas características físicas e químicas dos solos. Maiores teores de óxidos de ferro e menores valores de pH dos solos favorecem a sorção e a persistência do imazethapyr e imazapic. Concluiu-se que aplicações do imazethapyr e imazapic nos solos avaliados representam alto risco de contaminação do solo e das águas por esses herbicidas.

ABSTRACT

CASTRO NETO, Manoel Delintro de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2014. **Sorption, leaching and persistence of imidazolinones on soils cultivated with rice in Clearfield system.** Adviser: Francisco Affonso Ferreira. Co-advisers: Antonio Alberto da Silva and Paulo Roberto Cecon.

The contamination of soil and water with herbicides has caused major environmental concern. This concern is even greater when using these compounds in lowland irrigated areas in rice. In this work, we studied the behavior of imazethapyr herbicide imazapic and widely used in rice cultivation in Brazil. Three experiments were conducted to evaluate the sorption, leaching and persistence of imazethapyr and imazapic applied in mixture and isolated way in three provinietes soils of the state of Tocantins (Haplic Plinthosol (FX), Oxisol (LVA) and Epiaquic Haplustult (GX)) with different physical and chemical characteristics, used for growing rice and other annual crops. To determine sorption, leaching and persistence of herbicides in soil biological assays were used. It was observed that the sorption, leaching or the persistence of imazapic and imazethapyr alone and in combination, are influenced by the physical and chemical characteristics of the soil. Higher content of iron oxides and lower pH values favor the soil persistence of the sorption and imazapic and imazethapyr. It was concluded that applications of imazethapyr and imazapic in the evaluated soils represent a high risk of soil and water contamination by these herbicides.

INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do arroz (*Oryza sativa* L.), como qualquer cultura agrícola, está sujeita às variações do ambiente, as quais influenciam a produtividade de grãos, a qualidade do produto comercial e o custo de produção. Entre esses fatores, as plantas daninhas assumem lugar de destaque, em razão dos efeitos negativos observados no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade do arroz (BALBINOT et al., 2003).

Por pertencerem à mesma espécie botânica, as condições edafoclimáticas que favorecem o arroz cultivado também favorecem o arroz-vermelho (*Oryza sativa*). Essa semelhança dificulta o seu controle, o que exige a combinação de múltiplas ações, como: emprego de sementes isentas de arroz-vermelho, mudança no sistema de cultivo, uso da rotação de culturas, manejo adequado da água de irrigação e adoção de técnicas culturais alternativas (FISCHER; RAMIREZ, 1993).

O desenvolvimento de plantas de arroz tolerantes aos herbicidas do grupo das imidazolinonas, por meio da mutação induzida por radiação gama e, ou, transformação química por etil-metanossulfonato-SEM (CROUGHAN, 1998), permitiu a criação de uma tecnologia para o manejo do arroz-vermelho. Essa prática associa cultivares resistentes a herbicida não seletivo ao arroz-vermelho, sendo denominada sistema Clearfield® (SOSBOI, 2010). Embora este sistema tenha se apresentado como uma opção de manejo do arroz-vermelho em lavouras de arroz irrigado, sua utilização tem restringido a sucessão de culturas após seu cultivo. A presença de resíduos dos herbicidas pode estar em quantidade suficiente para interferir negativamente na safra

seguinte, seja ela com outras culturas suscetíveis ou mesmo com cultivares de arroz não resistentes às imidazolinonas (KRAEMER et al., 2009a,b; PINTO et al., 2011).

Dos herbicidas utilizados no sistema Clearfield[®], destaca-se a mistura comercial de imazethapyr e imazapic (Only[®]), aplicados em pós-emergência, em dose única ou em aplicação sequencial em pré e pós-emergência. Ambos os herbicidas pertencem ao grupo químico das imidazolinonas, que controlam amplo espectro de plantas daninhas, incluindo poáceas, ciperáceas e latifoliáceas (VILLA et al., 2006). O controle dessas plantas é proporcionado pela inibição da enzima acetolactato sintetase (ALS), também conhecida como aceto-hidroxiácido sintase (AHAS), sendo esta a primeira enzima na via metabólica de biossíntese dos aminoácidos alifáticos de cadeia ramificada: leucina, valina e isoleucina (TAN et al., 2006).

Os herbicidas imazethapyr [5-ethyl-2-(4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2imidazolin-2-yl) nicotinic acid] e imazapic [2-(4-isopropyl-4-methyl-5oxo-2-imidazolin-2-yl)-5-methylnicotinic acida] (Figura 1) são moléculas de grande uso no Brasil. São recomendados para o controle de plantas daninhas em pós-emergência na cultura da soja e em pré e pós-emergência nas culturas de amendoim e cana-de-açúcar, respectivamente. Eles apresentam alta solubilidade em água, caráter ácido, eficiência em dose baixa e elevada persistência no ambiente (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011).

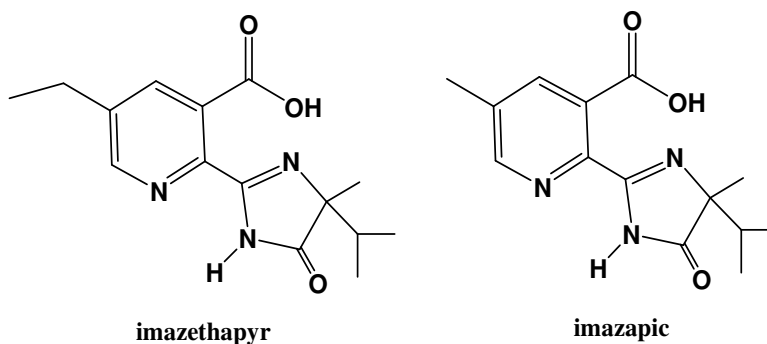


Figura 1 - Fórmulas estruturais.

As imidazolinonas apresentam comportamento anfótero, possuindo um grupo carboxílico (ácido) e um grupo amino (básico) como grupo funcional, comportando-se como ácido ou base fraca, respectivamente (KRAEMER et al., 2009a). O pKa do imazethapyr é de 3,9 no grupo carboxílico e de 2,1 no amino, e o do imazapic, de 3,9 no carboxílico, sofrendo influência direta do pH do meio (SENSEMAN, 2007). Em condições de pH elevado, a sorção das imidazolinonas é reduzida, em decorrência do

predomínio das formas dissociadas de caráter aniônico, as quais são repelidas pelas cargas negativas da matriz do solo, permanecendo biodisponíveis (EL MADANI et al., 2003), o que reduz sua persistência. Todavia, em solos altamente intemperizados, essas moléculas podem interagir com as porções positivas da matéria orgânica, com os cátions metálicos e com os óxidos de ferro, aumentando sua adsorção (FIRMINO et al., 2008).

Além de regular a persistência das imidazolinonas no solo, por determinar o quanto o herbicida fica disponível ou retido na matriz do solo, a sorção também influencia na movimentação dos herbicidas no perfil, ocorrendo, geralmente, relação inversa entre a sorção e o potencial de lixiviação (AHMAD; RAHMAN, 2009). A movimentação dos herbicidas na camada superficial do solo é necessária, a fim de melhorar a ação no controle de plântulas em germinação (OLIVEIRA; BRIGHENT, 2011). Contudo, se a lixiviação dos compostos for intensa, pode reduzir a eficiência dos herbicidas e causar sérios riscos ambientais, vindo a atingir o lençol freático, contaminando reservas de águas subterrâneas (DORES et al., 2009; ALISTER; KOGAN, 2010).

O movimento das imidazolinonas para camadas mais profundas também pode ter consequência no tempo de permanência, em função da menor atividade microbiana e decomposição fotolítica, consideradas a principal via de degradação desses herbicidas (WANG et al., 2005; ESPY et al., 2011).

O processo de degradação do imazethapyr e imazapic ocorre principalmente em condições aeróbicas, não sendo praticamente observado em condições de anaerobiose (KRAEMER et al., 2009b). Isso pressupõe que em solos cultivados com arroz irrigado, como os de várzea úmidos, esperam-se resultados diferentes dos observados em condições de terras altas (sequeiro), o que reduziria a degradação no período de alagamento, podendo aumentar a persistência e o risco de contaminação ambiental.

Na maioria dos solos tropicais, é limitado o conhecimento relacionado à movimentação das moléculas de herbicidas e suas interações de sorção com a matriz do solo. O processo de distribuição e degradação de herbicidas no solo é dinâmico e único para cada relação solo/herbicida. Além disso, sua dependência está relacionada às propriedades físico-químicas dos compostos, à sua interação com o solo, às condições climáticas, à vegetação e cobertura, às propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e ao manejo da área (KUDSK; STREIBIG, 2003; HAGER; NORDBY, 2004).

Na busca por alternativas para que se façam recomendações seguras da mistura comercial de imazethapyr e imazapic em solos tropicais, realizou-se este trabalho, objetivando avaliar a sorção, lixiviação e persistência desses herbicidas, isolados e em mistura comercial, em três solos do Estado do Tocantins, pelas técnicas de bioensaios.

LITERATURA CITADA

AGOSTINETTO, D.; LAMEGO, F. P.; PINTO, J. J. O. Arroz vermelho: Ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 341-349, 2001.

AHMAD, R.; RAHMAN, A. Sorption characteristics of atrazine and imazethapyr in soils of New Zealand: importance of independently determined sorption data. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 22, p. 10866-10875, 2009.

ALISTER, C.; KOGAN, M. Rainfall effect on dissipation and movement of diuron and simazine in a vineyard soil. **Planta Daninha**, v. 28, p. 1059-1071, 2010. (Número Especial).

BALBINOT Jr., A. A.; FLECK, N. G.; BARBOSA NETO, J. F.; RIZZARDI, M. A. Características de plantas de arroz e a habilidade competitiva com plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 165-174, 2003.

CROUGHAN, T P. **Herbicide resistant rice**. In: UNITED STATES PATENT. [5,773,704]. p. 6-30, 1998.

DORES, E. F. G. C.; SPADOTTO, C. A.; WEBER, O. L. S.; CARBO, L.; VECCHIATO, A. B.; PINTO, A. A. Environmental behaviour of metolachlor and diuron in a tropical soil in the central region of Brazil. **Water Air Soil Pollut**, v. 197, n. 1, p. 175-183, 2009.

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

ESPY, R.; PELTON, E.; OPSETH, A.; KASPRISIN, J.; NIENOW, A. N. Photodegradation of the herbicide imazethapyr in aqueous solution: effects of wavelength, pH, and natural organic matter (NOM) and analysis of photoproducts. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 7277-7285, 2011.

- FIRMINO, L. E.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R.; TIBURCIO, R. A. S. Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 395-402, 2008.
- FISCHER, A. J.; RAMIREZ, A. Red rice (*Oryza sativa*): competition studies for management decisions. **International Journal of Pest Management**, London, v. 39, n. 2, p. 133-138, 1993.
- HAGER, A.; NORDBY, D. Herbicide persistence and how to test for residues in soils. In: BISSONNETTE, S. **Illinois agricultural pest management handbook**. Illinois: University of Illinois Extension, 2004. p. 323-326.
- KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M.; MASSONI, P. F. S.; SARTORI, G. M. S. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009a.
- KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M. Destino ambiental dos herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 629-639, 2009b.
- KUDSK, P.; STREIBIG, J. C. Herbicides – a two edged sword. **Weed Research**, v. 43, n. 2, p. 90-102, 2003.
- OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENT, A. M. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011. p. 263-304.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina, PR: 2011. 697 p.
- SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.
- SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO [SOSBAI]. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre: Sosbai, 2010. 188 p.
- TAN, S.; EVANS, R.; SINGH, B. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. **Amino Acids**, v. 30, n. 2, p. 195-204, 2006.
- VILLA, S. C. C.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A.; MASSONI, P. F. S.; TELO, G. M.; MACHADO, S. L. O.; CAMARGO, E. R. Arroz tolerante a imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.
- WANG, X.; ZHOU, S.M.; FAN, D. Biodegradation of imazapyr in typical soils in Zhejiang Province, China. **Journal Environmental Science**, v. 17, n. 4, p. 593-597, 2005.

SORÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADAS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO ARROZ

RESUMO

Conhecer o coeficiente de sorção de um herbicida no solo onde será aplicado é condição essencial para o sucesso agrônômico e ambiental da tecnologia. Todavia, o processo que comanda a disponibilidade do herbicida na solução do solo depende das forças de atração das moléculas do composto pelos colóides do solo (sorção). Os estudos de sorção de herbicidas em solos podem ser realizados por métodos químicos e/ou biológicos. Nesta pesquisa utilizou-se o método biológico, onde foi estimada a capacidade sorativa de amostras de solos do Estado de Tocantins (Latosolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletados em Gurupi, Plintossolo Háptico (FX) em Formoso do Araguaia, e de um Gleissolo Háptico (GX) em Lagoa da Confusão)), aos herbicidas imazethapyr e Imazapic, aplicados em mistura comercial (Only[®]) e de forma isolada. Foram, ainda, identificados os atributos desses solos que afetam a sorção dos referidos herbicidas. Para interpretação dos resultados foram determinados o valor do C₅₀ (dose que inibiu 50% no acúmulo de massa da matéria seca da planta-teste) e a relação de sorção para os diferentes solos. A sorção dos referidos herbicidas nos solos avaliados foi baixa e muito influenciada pelo pH e concentração de óxido de ferro e apresentou a seguinte ordem decrescente nos substratos: GX > LVA > FX > areia lavada. Considerando que os herbicidas imazethapyr e imazapic apresentam longa persistência no solo concluiu-se que nos solos avaliados, quando aplicados de forma isolada ou em mistura comercial, estes compostos têm alto potencial de lixiviação e podem contaminar águas subterrâneas.

Palavras-chave: bioensaio, imazapic, imazethapyr, only[®].

SORPTION OF IMIDAZOLINONES ON SOILS CULTIVATED WITH RICE IN CLEARFIELD SYSTEM

ABSTRACT

Know the sorption coefficient of a herbicide in the soil where it will be applied is essential for the agronomic and environmental success of the technology. However, the process that drives the availability of the herbicide in the soil solution depends on the forces of attraction of the molecules of the compound by soil colloids (sorption). Herbicides in Soil sorption studies can be performed by chemical and / or biological methods. In this research we used the biological method, which was estimated sorption capacity of Tocantins State soil samples (Oxisol (LVA) collected in Gurupi, Haplic Plinthosol (FX) in Formoso do Araguaia, and a Eptaquic Haplustult (GX) Confusion in the lagoon)), herbicide imazethapyr and imazapic applied in commercial mixture (Only®) and in isolation. Were also identified attributes from those soils that affect the sorption of said herbicides. To interpret the results were determined the value of C50 (dose that inhibits 50% of mass accumulation of dry matter of the plant-test) and the sorption ratio for different soils. Sorption of these herbicides in soils, was low and very influenced by the pH and iron oxide concentration and showed the following descending order in the substrates: GX> LVA> FX> washed sand. Whereas the imazethapyr herbicide imazapic and have long persistence in soil was concluded that the evaluated soils when applied alone or in commercial mixture, these compounds have high leaching potential and can contaminate groundwater.

Keywords: bioassay, imazapic, imazethapyr, Only®.

INTRODUÇÃO

A agricultura tradicional sofreu drásticas mudanças, com a inserção de novas tecnologias visando à produção extensiva de *commodities* agrícolas. Essas tecnologias envolvem em sua maioria o uso intensivo de agrotóxicos, com a finalidade de controlar pragas agrícolas e aumentar a produtividade. No Brasil, o lançamento de cultivares resistentes aos herbicidas do grupo das imidazolinonas permitiu o desenvolvimento de uma tecnologia de manejo do arroz-vermelho que faz o uso de herbicidas não seletivos a este arroz, a qual foi denominada sistema de produção Clearfield® (VILLA et al., 2006).

Nesse sistema, a utilização da mistura comercial de imazethapyr (75 g L⁻¹) e imazapic (25 g L⁻¹) em genótipos de arroz resistentes às imidazolinonas constitui ferramenta eficiente no controle do arroz-vermelho em lavouras de arroz irrigado (OTTIS et al., 2003). No entanto, tem sido demonstrado que a adoção do sistema Clearfield® no cultivo de arroz pode restringir a rotação de culturas (GROSH et al., 2008; PINTO et al., 2011).

Associado à sua longa persistência no ambiente e à alta solubilidade em água, os herbicidas do grupo das imidazolinonas apresentam alto risco de contaminar fontes hídricas (KRAEMER et al., 2009b). Em razão dessas características, o conhecimento do comportamento desses e de outros compostos químicos é de fundamental importância, a fim de prevenir os danos causados por esses agrotóxicos aos ecossistemas edáficos e aquáticos.

A dinâmica dos herbicidas no solo é bastante complexa e resulta de vários fatores, entre os quais destaca-se o processo de sorção, que denota a interação entre o soluto e a fase sólida do solo (AHMAD et al., 2001). A sorção controla a biodisponibilidade do herbicida à planta-alvo e aos microrganismos do solo, bem como o movimento do produto químico através do perfil do solo (BRESNAHAN et al., 2000; HERWIG et al., 2001). Por outro lado, ocorre, geralmente, relação inversa entre a sorção e o potencial de lixiviação.

O processo de sorção é afetado por uma série de propriedades do solo e pela natureza do produto químico. O teor de matéria orgânica no solo é a propriedade mais importante quando se trabalha com herbicidas não polares (OLIVEIRA et al., 2004). Para compostos químicos polares, como os ácidos fracos, o pH é o fator de interferência mais importante no potencial de sorção (OLIVEIRA JR. et al., 1999; AHMAD; RAHMAN, 2009).

Além do uso em mistura, o imazapic é recomendado no controle de plantas daninhas nas culturas do amendoim e cana-de-açúcar, enquanto o imazethapyr é registrado apenas para a soja (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). A presença do ácido carboxílico e do grupo funcional básico da piridina faz com que esses compostos sejam considerados moléculas anfóteras, ou seja, apresentam comportamento no solo variável de acordo com o pH do meio (EL MADANI et al., 2003; SENSEMAN, 2007). Segundo esses autores, em pH próximo à neutralidade ou superior, a sorção é reduzida, em decorrência do predomínio da forma COO⁻ das moléculas, as quais são repelidas pelas

cargas negativas da matriz do solo, permanecendo maior quantidade do composto na solução do solo e, conseqüentemente, maior propensão à lixiviação.

Mediante a diversidade de comportamento do imazethapyr e do imazapic nos diferentes tipos de solo e a escassez de informações em ambientes tropicais, objetivou-se com este trabalho avaliar a sorção desses herbicidas, isolados e em mistura comercial, em três solos com diferentes características físicas e químicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, no campus da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizados quatro substratos, sendo três solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX), provenientes, respectivamente, de Formoso do Araguaia, Gurupi e Lagoa da Confusão, Estado do Tocantins, e areia lavada, a qual foi considerada como material inerte. Todas as amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, peneiradas em malhas de 4 mm e, posteriormente, caracterizadas química e fisicamente (Tabelas 1 e 2). Os ensaios foram conduzidos simultaneamente, de forma independente para cada substrato e herbicida.

Tabela 1 - Resultados das análises química e físico-químicas das amostras dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Solo	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	(t)	V	m
		(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)					(%)	
FX	6,1	3,5	27	3,39	1,35	0,00	3,0	4,8	61,6	0,0
LVA	5,7	0,8	79	0,99	0,52	0,00	4,7	1,7	26,7	0,0
GX	5,2	1,3	82	1,69	0,75	0,57	5,2	3,2	33,8	17,7
		Fe Oxalato		Fe Ditionito			MO			
		(dag kg ⁻¹)								
FX		0,10		1,29			2,22			
LVA		0,14		2,19			3,00			
GX		0,56		0,83			2,35			

Análises realizadas segundo metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

Tabela 2 - Resultados das análises físicas e classificação textural das amostras dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Solo	A. Grossa	A. Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	(dag kg ⁻¹)				
FX	17	30	16	37	Argilo Arenosa
LVA	32	23	6	39	Argilo Arenoso
GX	0	32	45	23	Franco

No preparo do substrato inerte, fez-se a incubação da areia com ácido clorídrico PA, diluído em água, numa proporção de 600 mL de ácido para cada 10 L de água, mantendo-se lâmina de 10 cm da solução ácida acima do nível da areia, por 36 horas, seguida de nova incubação por mais 36 horas com solução de hidróxido de sódio PA, na mesma proporção. Após esse período, a areia foi lavada com água corrente, até que fosse retirado o excesso de hidróxido, alcançando um pH próximo de 7,0.

A fim de estimar o potencial de sorção do imazethapyr e imazapic em mistura comercial e isolados nos substratos, foram conduzidos vários experimentos preliminares com cada substrato para definir a dose do herbicida capaz de inibir 50% do acúmulo de massa da matéria seca da espécie bioindicadora. Inicialmente, foram realizados experimentos preliminares com três repetições no delineamento inteiramente casualizado (DIC), no qual foram avaliadas sete doses com amplitudes maiores e definidas tomando-se como base as características físicas e químicas de cada substrato. Esses experimentos foram repetidos, ajustando-se as doses até que fossem encontradas faixas que permitissem definir as doses extremas de cada herbicida nos diferentes substratos.

Após essas etapas preliminares, foram estipuladas as doses de cada um dos herbicidas a serem avaliadas em cada substrato (Tabela 3), para que fossem realizados os experimentos definitivos. Adotou-se a mesma metodologia dos ensaios preliminares.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de plásticos preenchidos com 0,33 dm³ dos substratos, compostos pelos três tipos de solo e pelo substrato inerte. A massa dos substratos (solos e areia) foi igual para todos os vasos, dentro do mesmo tipo de substrato. Após o preenchimento dos vasos, foram semeadas cinco sementes de sorgo forrageiro (*Sorghum vulgare*), cultivar BRS 655, por vaso, na profundidade de 1,5 cm. Em seguida, aplicaram-se as doses de cada produto comercial na superfície dos substratos, por meio de um pulverizador pressurizado a CO₂

comprimido, equipado com barra com dois bicos TT11002, espaçados de 0,50 m, num volume de calda de 150 L ha⁻¹. Aos dez dias após emergência (DAE), foi realizado o desbaste, permanecendo apenas três plantas em cada vaso.

Tabela 3 - Doses do imazethapyr e imazapic isolados e em mistura * em g ha⁻¹ aplicadas nos diferentes substratos: areia lavada, Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Areia lavada	FX	LVA	GX
Doses (g ha ⁻¹)			
0,0	0,0	0,0	0
1,5	2,5	2,5	5,0
3,0	5,0	5,0	15,0
4,5	10,0	10,0	20,0
6,0	20,0	20,0	30,0
7,5	25,0	25,0	50,0
9,0	30,0	30,0	60,0

*/ Foram aplicados os seguintes produtos comerciais: Pivot[®] (100 g i.a. L⁻¹ de imazethapyr), Plateau[®] (700 g i.a kg⁻¹) e Only[®] contendo 75 + 25 g i.a L⁻¹ de imazethapyr + imazapic, respectivamente.

Durante a condução do experimento, os vasos foram irrigados diariamente, mantendo-se sempre a umidade do solo próximo à capacidade de campo. Para manter o bom crescimento das plantas indicadoras, estas foram irrigadas com solução nutritiva completa de Hoagland e Arnon (1950).

Aos 21 DAE, foi realizada a colheita dos experimentos, que consistiu no corte da parte aérea das plantas na altura do coleto. Posteriormente, todo esse material foi seco em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) até atingir massa constante, sendo determinada a massa da matéria seca das plantas em balança com precisão de 0,0001 g. Os valores de massa da matéria seca (MS) das plantas de sorgo foram transformados para porcentagem em relação à MS da testemunha, adotando-se 100% para MS da testemunha.

Os resultados obtidos foram interpretados, a partir da comparação dos valores de massa da matéria seca da parte aérea dos substratos tratados com herbicida com os do tratamento sem herbicida (dose zero), sendo submetidos à análise de regressão, utilizando-se o modelo log-logístico não linear proposto por Seefeldt et al. (1995):

Equação 1: modelo log-logístico não linear

$$Y = f(x) = C + \frac{D - C}{1 + \frac{(X)^b}{C_{50}}}$$

em que C e D correspondem ao nível máximo e mínimo da curva de dose-resposta, respectivamente; b , ao declive da curva em torno do C_{50} ; e C_{50} , à dose-resposta referente à redução de 50% da massa da matéria seca da parte aérea da planta indicadora.

A partir dos dados obtidos de C_{50} para cada solo e para areia, calculou-se a relação de sorção (RS) do solo em relação à resposta obtida em areia para a espécie bioindicadora (SOUZA, 1994):

Equação 2: equação da relação de sorção entre solo e areia

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

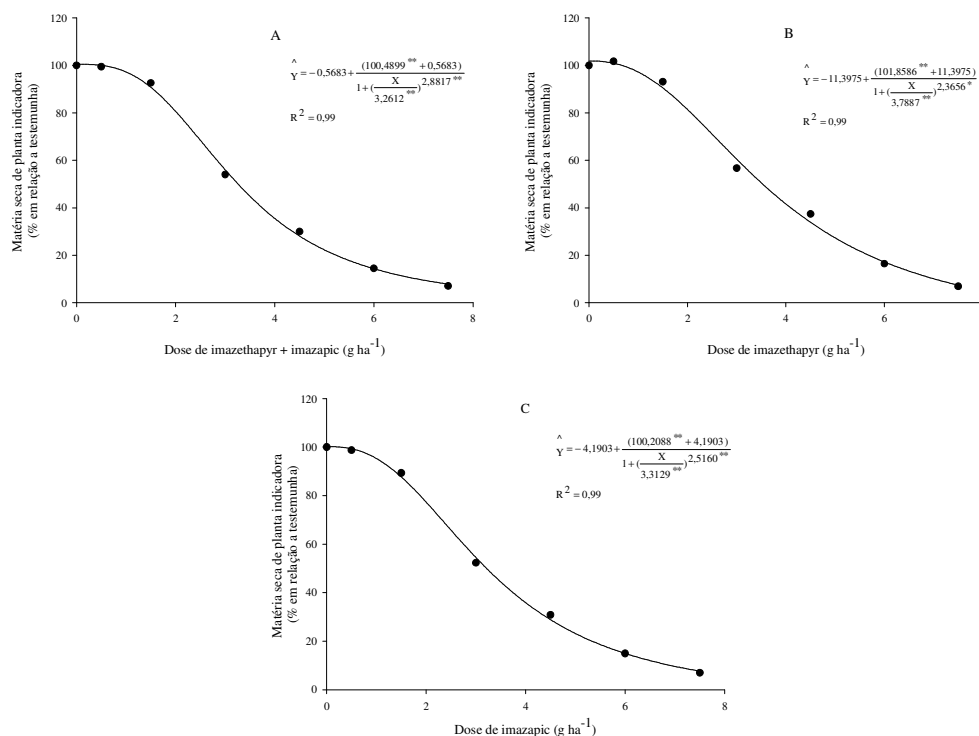
RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de porcentagens de massa da matéria seca (MS) da parte aérea, em relação à testemunha, de plantas de sorgo, em função das doses crescentes de imazethapyr e imazapic em mistura comercial e isolados, aplicadas no substrato areia lavada, estão apresentadas na Figura 1. A matéria seca das plantas de sorgo cultivado em areia lavada foi inversamente proporcional ao aumento das doses dos herbicidas imazethapyr e imazapic em mistura e isolados. Considerando como zero a sorção no substrato areia lavada, verificou-se que a dose de 1,5 g ha⁻¹ de imazethapyr e imazapic em mistura e isolados reduziu em 7,4, 6,9 e 10,7% o crescimento das plantas de sorgo, respectivamente (Figura 1).

As doses em g ha⁻¹ do imazethapyr, do imazapic e da mistura comercial foram capazes de reduzir em 50% a matéria seca das plantas de sorgo cultivada em areia lavada. Os valores foram de 3,26, 3,78 e 3,3, para o imazethapyr, imazapic e mistura, respectivamente (Figura 1A, B e C). O sorgo forrageiro cv. BRS 655 apresenta alta sensibilidade ao imazethapyr e imazapic em mistura e isolados, podendo ser utilizado como espécie bioindicadora para esses herbicidas. Resultados encontrados por outras pesquisas também demonstraram a alta sensibilidade do sorgo aos herbicidas do grupo das imidazolinonas (FIRMINO et al., 2008; PINTO et al., 2009).

Utilizando a equação ajustada, determinou-se a concentração da mistura comercial de imazethapyr e imazapic capaz de inibir em 50% o acúmulo de matéria seca das plantas de sorgo (C_{50}) aos 21 DAE, de acordo com o substrato utilizado: Plintossolo

Háplico, 9,86 g ha⁻¹; Latossolo Vermelho-Amarelo, 10,86 g ha⁻¹; e Gleissolo Háplico, 20,85 g ha⁻¹ (Figura 2A, B e C).



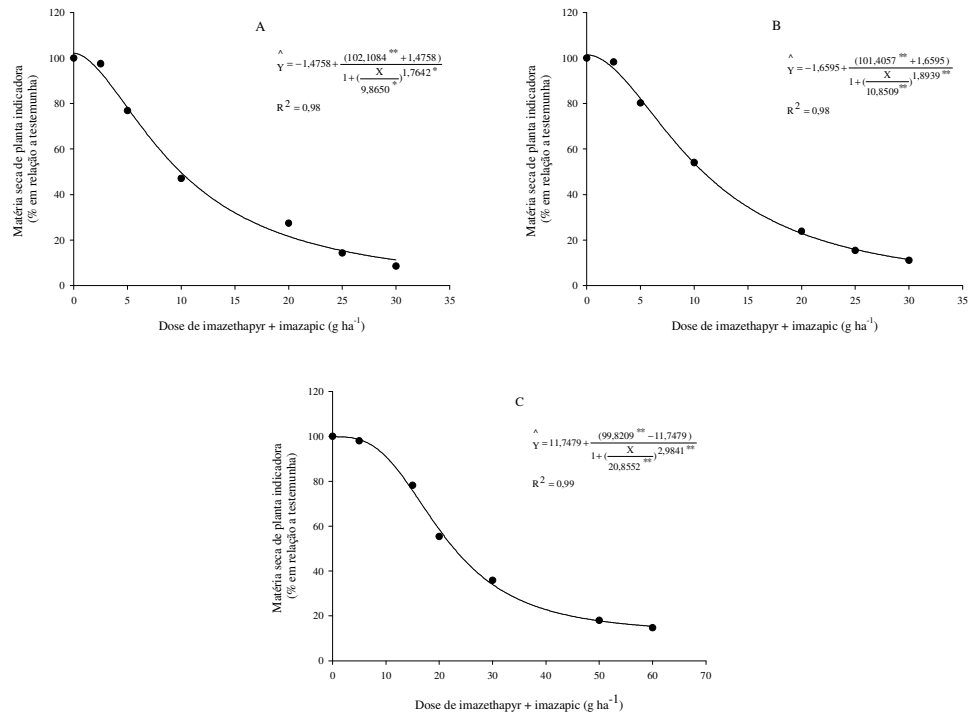
*** significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t.

Figura 1 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas por 21 dias em areia lavada, tratadas com doses crescentes de diferentes herbicidas: (A) imazethapyr + imazapic; (B) imazethapyr; e (C) imazapic, aplicados em pré-emergência.

A variação nos valores encontrados para a C₅₀ em cada substrato pode ser atribuída às interações entre as moléculas dos herbicidas e os sítios sortivos, seja da matéria orgânica ou dos minerais de argila. Nesse sentido, as características químicas e físicas dos solos tendem a provocar retenção diferencial dos herbicidas, o que refletirá na biodisponibilidade distinta destes na solução do solo, podendo influenciar o controle das plantas daninhas e a sua lixiviação para camadas mais profundas (GERSTL, 2000).

O carregamento de moléculas de herbicidas até maiores profundidades no perfil do solo pode aumentar o efeito da persistência, em função da menor atividade microbiana, sendo esta considerada a principal via de degradação da maioria dos herbicidas (DAS et al., 2003). Esse fato é agravado devido à lixiviação ascendente, muito comum em herbicidas do grupo das imidazolinonas, causando danos em culturas

sensíveis. Assim, o transporte ascendente das imidazolinonas pode ser um dos causadores dos problemas relacionados à persistência do herbicida em áreas cultivadas com arroz irrigado (BUNDT et al., 2013).

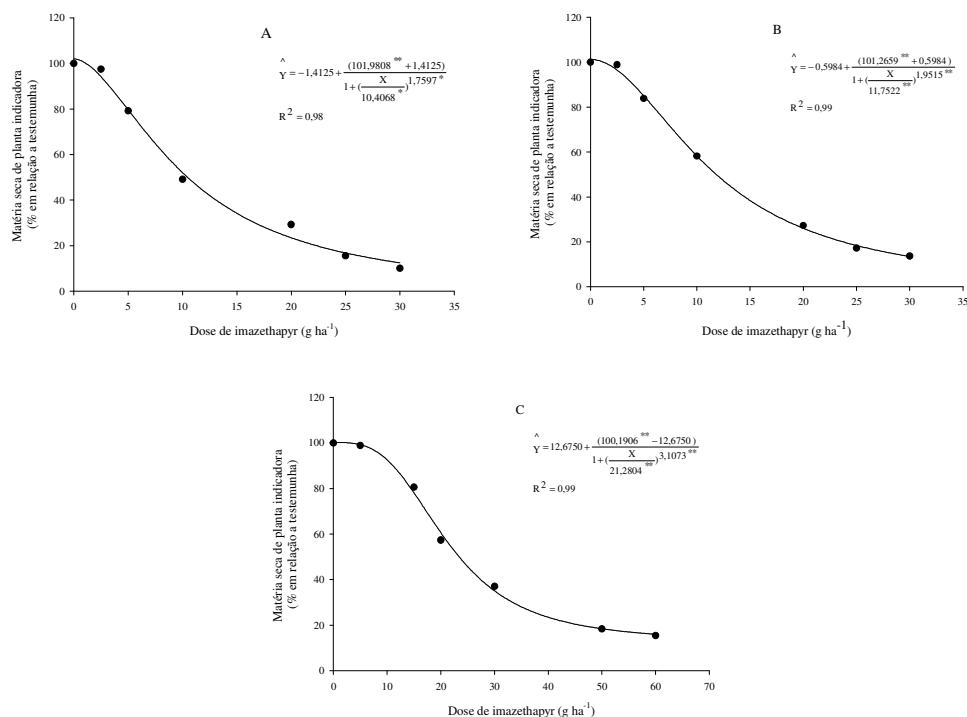


*** significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t.

Figura 2 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas por 21 dias em amostras dos solos: (A) Plintossolo Háplico (FX), (B) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e (C) Gleissolo Háplico (GX), tratados com doses crescentes da mistura de imazethapyr e imazapic.

Valores similares aos da mistura comercial para C_{50} : A - Plintossolo Háplico (FX), B - Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e C - Gleissolo Háplico (GX) também foram observados quando se aplicou o imazethapyr isolado nos diferentes solos: FX, 10,70 $g\ ha^{-1}$; LVA, 11,75 $g\ ha^{-1}$; e GX, 21,28 $g\ ha^{-1}$ (Figura 3A, B e C).

Verificou-se que o solo GX da Lagoa da Confusão necessitou de uma dose de imazethapyr 1,98 e 1,81 vezes superior àquela utilizada nos solos FX e LVA, respectivamente. Esse fato pode ser atribuído ao menor valor de pH (5,2) e aos maiores teores de óxidos de ferro oxálico (0,56 $dag\ kg^{-1}$) apresentados por este solo, quando comparados aos dos solos provenientes de Formoso do Araguaia (FX) e Gurupi (LVA).



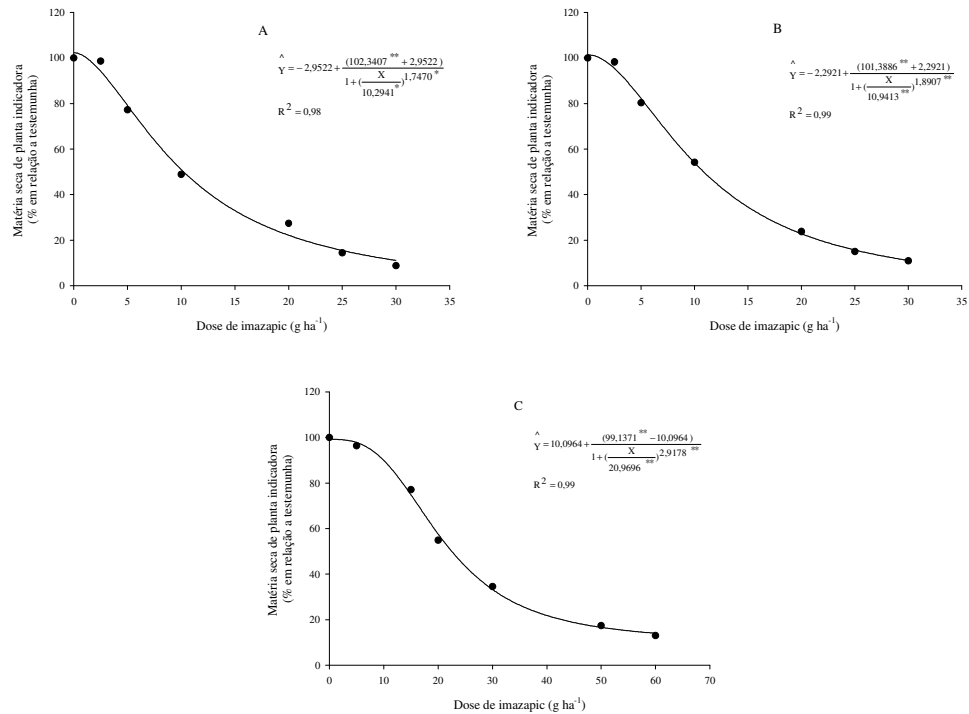
** e * significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t.

Figura 3 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em amostras dos solos: (A) Plintossolo Háplico (FX), (B) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), (C) Gleissolo Háplico (GX), tratados com doses crescentes de imazethapyr.

Acredita-se que, além do pH e óxidos de ferro oxálico, os teores de silte (45 dag kg^{-1}) também podem ter influenciado na maior concentração do herbicida para inibir em 50% a matéria seca das plantas de sorgo, visto que, pelo método biológico, o herbicida necessita lixiviar alguns centímetros para que encontre as raízes da planta bioindicadora. Nesse caso, teores elevados de silte verificados nesse solo impedem o movimento de água no seu perfil, uma vez que essa fração tem baixo potencial para formar agregados. Além disso, essas partículas têm pequeno tamanho uniforme, o que facilita seu deslocamento para camadas mais profundas, onde podem causar obstrução dos poros (STÜRMER, 2008) e microporos.

Quando da aplicação do imazapic, as doses requeridas para reduzir o crescimento das plantas de sorgo em 50% em relação à testemunha nos diferentes solos foram: FX, $10,29 \text{ g ha}^{-1}$; LVA, $10,94 \text{ g ha}^{-1}$; e GX, $20,96 \text{ g ha}^{-1}$ (Figura 4A, B e C). Observou-se que o solo FX apresentou menor concentração do herbicida, seguido do LVA. Estes solos apresentam baixos valores de óxidos de ferro oxálico: 0,10 e

0,14 dag kg⁻¹, respectivamente, além de pH mais elevado, o que justifica a menor concentração do herbicida nos solos para reduzir o crescimento das plantas de sorgo.



** e * significativo a 1 e 5%, respectivamente pelo teste t.

Figura 4 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em amostras dos solos: (A) Plintossolo Háplico (FX), (B) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e (C) Gleissolo Háplico (GX), tratados com doses crescentes de imazapic.

Alta correlação positiva foi constatada entre a sorção e os teores de Fe oxálico (0,99**) e negativa para o pH (-0,91**) e argila (-0,96*) dos três solos avaliados (Tabela 4). Não houve correlação significativa para matéria orgânica (-0,27^{ns}), capacidade de troca catiônica efetiva (-0,09^{ns}) e Fe ditionito (-0,65^{ns}). Contrariamente, Firmino et al. (2008) encontraram alta correlação entre a relação de sorção do imazapayr e a matéria orgânica (0,99**) e Fe ditionito (0,73*) em três solos do Estado de Minas Gerais. Esses resultados demonstram que, nos solos estudados neste trabalho, os valores de pH e argila estão inversamente relacionados com a sorção do imazethapyr + imazapyr, em mistura ou em aplicações isoladas. Já os teores de óxidos de ferro oxálico são diretamente proporcionais à relação de sorção dos três solos estudados.

Tabela 4 - Correlações de Pearson entre relação de sorção (RS) dos herbicidas imazethapyr e imazapic isolados e em mistura e algumas características químicas e físicas dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Características ^{1/}	RS	pH (H ₂ O)	MO	Fe oxalato	Fe ditionito	Argila	t ^{2/}
RS	1,00	-0,91*	-0,27	0,98*	-0,65	-0,96*	-0,09

* significativo pelo teste t ($p < 0,01$). ^{1/} MO = matéria orgânica ^{2/} t = capacidade de troca catiônica efetiva (CTC).

Esses resultados corroboram os observados por Ahmad e Rahman (2009), que relataram maiores valores de K_d do imazethapyr em amostras de solos com menores valores de pH, sendo a correlação negativa entre os parâmetros. Oliveira Jr. et al. (2001) e Aichele e Penner (2005) observaram decréscimo na retenção do imazethapyr com o aumento do pH da solução do solo. Tanto o imazethapyr como o imazapic possuem capacidade de dissociação eletrolítica (pK_a) de 3,9, o que os caracteriza como ácidos fracos (SENSEMAN, 2007). Em valores de pH acima do pK_a , essas moléculas encontram-se predominantemente na forma ionizada, ou seja, com carga residual líquida negativa, o que faz com que elas permaneçam na solução do solo, com maior risco de contaminar águas subterrâneas.

O solo que apresentou maior potencial de sorção dos herbicidas em estudo foi o Gleissolo Háplico de textura franca. Os valores observados para a relação de sorção dos substratos calculados a partir da Equação 2 foram de 5,40, 4,63 e 5,33, para a mistura comercial de imazethapyr e imazapic, o imazethapyr e o imazapic, respectivamente (Tabela 5). Esse resultado demonstra que a sorção dos herbicidas em estudo é muito similar.

Tabela 5 - Características químicas e físicas dos solos e relação de sorção

Substrato ^{1/}	pH	Argila	MO	FeO ^{2/}	Relação de Sorção (RS)		
					(dag kg ⁻¹)		
					Mistura	Imazethapyr	Imazapic
Areia	7,0	-	-	-	-	-	-
FX	6,1	37	2,22	0,10	2,02	1,75	2,11
LVA	5,7	39	3,00	0,14	2,33	2,11	2,31
GX	5,2	23	2,35	0,56	5,40	4,63	5,33

^{1/} FX-Plintossolo Háplico, LVA-Latossolo Vermelho-Amarelo e GX- Gleissolo Háplico. ^{2/} Fe oxalato.

Em pH próximo ao encontrado no Gleissolo Háplico (5,2), a dissociação do íon H^+ do grupo carboxílico e do anel da imidazolinona, presentes na molécula desses herbicidas, pode ser favorecida. Nessa condição, as moléculas, passam a apresentar predominantemente cargas líquidas negativas, levando-o a interagir com sítios positivos da matéria orgânica e de cátions metálicos, como os óxidos de ferro. Segundo Firmino (2008), esse fato aumentaria a adsorção desses herbicidas com as superfícies de argilas ricas em óxidos de ferro.

O potencial de sorção do imazethapyr e imazapic, tanto em mistura ou isolados, para o FX e para o LVA foi semelhante, como pode ser confirmado pelos valores muito próximos de RS encontrados para esses solos (Tabela 5).

Apesar de serem solos de diferentes ecossistemas: FX (várzeas) e LVA (cerrado), ambos apresentam as características mais relevantes com a relação de sorção desses herbicidas: pH e Fe oxálico, com valores muito similares (6,1 e 5,7) para unidades de pH; e 0,10 e 0,14 dag kg^{-1} para o teor de Fe oxálico, no Plintossolo Háplico e Latossolo Vermelho-Amarelo, respectivamente.

Considerando o caráter de ácido fraco do imazethapyr e imazapic, provavelmente houve aumento na porcentagem de espécies aniônicas do herbicida nos solos com pH mais elevados. Isso causa aumento na repulsão entre as moléculas dos herbicidas e os sítios de carga negativa dos coloides do solo, o que favoreceu a redução observada na RS.

Além da repulsão devida às forças eletrostáticas, outro fato que pode ter contribuído para a baixa relação de sorção desses herbicidas nos solos FX e LVA foi a alta solubilidade deles em água. Tanto o imazethapyr com o imazapic tinham os seus pKas menores que o pH do solo, e nessas condições há aumento da solubilidade, em razão da grande quantidade de moléculas dissociadas (AHAMAD et al., 2001). O aumento da solubilidade em água diminui a hidrofobicidade, e, com isso, a capacidade de sorção do imazethapyr e imazapic nos coloides orgânicos do solo é reduzida. Ahmad e Rahman (2009), trabalhando com solos da Nova Zelândia, verificaram que a sorção do imazethapyr foi maior em solos com pH menor que 5, quando comparado a valores superiores de pH. Barison et al. (2005), em pesquisa relacionada com a sorção do imazaquim, herbicida do mesmo grupo químico do imazethapyr e imazapic, concluíram que a sorção dessa molécula ao solo é resultante da influência mútua de forças eletrostáticas (repulsivas ou atrativas) e de interações hidrofóbicas do imazaquim com a matriz do solo.

Em geral, solos que possuem altos teores de argila e matéria orgânica, ou ambos, apresentam maior sorção e persistência de herbicidas, seguido por baixos índices de lixiviação e de degradação destes (LI et al., 2003; SI et al., 2006). No entanto, neste estudo, o pH do solo e os teores de óxidos de ferro oxálico, associados ao caráter ácido fraco das moléculas, foram as características que mais influenciaram a sorção desses compostos no solo.

Independentemente do tipo de herbicida, a relação de sorção apresentou a seguinte ordem decrescente entre os solos: GX > LVA > FX (Tabela 5). Na mistura comercial, a relação de sorção do GX (5,40) é aproximadamente 2,3 e 2,7 vezes maior que a dos solos LVA (2,22) e FX (2,02). O imazethapyr e imazapic em formulações isoladas também apresentaram valores próximos aos da mistura (Tabela 5).

Aliado ao problema de persistência no solo, a mistura comercial de imazethapyr e imazapic é potencialmente lixiviada no solo. Martini et al. (2011), avaliando o efeito do manejo de irrigação do arroz sobre a lixiviação, verificaram que a mistura comercial se concentra na camada de 5-20 cm de profundidade em solo de várzea, indicando ser passível de movimentação ao longo do perfil do solo. Em solo com baixa relação de sorção (Plintossolo Háplico), o processo de lixiviação dos herbicidas no solo pode ser intenso. Nesse caso, a mistura pode perder a sua eficiência no controle das plantas daninhas e causar sério impacto ambiental, podendo atingir o lençol freático e contaminar reservas de águas subterrâneas (DORES et al., 2009; ALISTER; KOGAN, 2010).

Além do problema de contaminação de águas subterrâneas, o uso do imazethapyr em pós-emergência na cultura da soja deixa resíduo suficiente para causar danos na cultura subsequente, como: milho (DAN et al., 2012), girassol (BRIGHENTI et al., 2002) e sorgo (INOUE et al., 2000). O problema de lixiviação do imazethapyr também foi relatado por Andrade et al. (2011). Estes autores, avaliando o potencial de lixiviação de vários herbicidas em áreas agrícolas do município de Rio Paranaíba, concluíram que o imazethapyr mostrou o maior risco de contaminação ambiental nas condições em que foi realizado o estudo.

Monqueiro et al. (2010), trabalhando com a persistência e lixiviação do imazapic, constataram que a sua utilização sem conhecimento dos fatores que afetam a sua interação com as características químicas e físicas do solo pode causar danos às culturas em rotação, como a cana-de-açúcar ou o amendoim. Esses autores também ressaltaram que o imazapic apresentou maior lixiviação em um Latossolo Vermelho

Distrófico com pH 6,0 e menor no mesmo solo com pH 4,0. A alta persistência e lixiviação no ambiente, aliada à baixa sorção dos herbicidas do grupo das imidazolinonas, podem restringir o uso desses compostos (KRAEMER et al., 2009a). Nesse sentido, a baixa relação de sorção dessas moléculas em solos com pH elevado pode predispor culturas sensíveis à ação desses herbicidas quando da realização da calagem em áreas pré-tratadas com eles, principalmente em solos com baixos teores de óxidos de ferro oxálico.

Pode-se concluir que a sorção do imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial, está diretamente relacionada aos teores de ferro oxálico, visto que o solo com os maiores teores desses compostos, o GX, mostrou maior relação de sorção. A capacidade sorativa dos herbicidas nos solos em estudo foi reduzida com o aumento do pH. Solos com maiores valores de pH (FX e LVA) mostraram menor relação de sorção. Esses resultados reforçam a necessidade do conhecimento dos fatores que afetam a dinâmica dos herbicidas no ambiente. Esse conhecimento é de fundamental importância para se prever o comportamento dos herbicidas no solo, o que possibilita a escolha de dosagens adequadas, bem como evitar efeitos prejudiciais ao ambiente e às culturas subsequentes.

LITERATURA CITADA

AICHELE, T. M.; PENNER, D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil. **Weed Technology**, v. 19, n. 1, p. 154-159, 2005.

AHMAD, R.; RAHMAN, A. Sorption characteristics of atrazine and imazethapyr in soils of New Zealand: importance of independently determined sorption data. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 22, p. 10866-10875, 2009.

AHMAD, R.; KOOKANA, R. S.; ALSTON, A. M. Sorption of ametryn and imazethapyr in twenty-five soils from Pakistan and Australia. **Journal Environmental Science and Health**, v. 36, n. 2, p. 143-60, 2001.

ALISTER, C.; KOGAN, M. Rainfall effect on dissipation and movement of diuron and simazine in a vineyard soil. **Planta Daninha**, v. 28, p. 1059-1071, 2010. (Número Especial)

ANDRADE, A. S.; REIS, M. R.; DRUMOND, L. C. D.; CAIXETA, S. P.; RONCHI, C. P. Potencial de lixiviação de herbicidas em solos agrícolas na região do Alto Paranaíba (MG). **Pesticidas: Revista de ecotoxicologia e meio ambiente**, v. 21, p. 95-102, 2011.

AVILA, L. A.; MARCHEZAN, M.; FRANÇOIS, T.; CEZIMBRA, D. M.; SOUTO, K. M.; REFATTI, J. P. Toxicidade da mistura formulada de imazethapyr e imazapic sobre o azevém em função do teor de umidade do solo. **Planta Daninha**, v. 28, p. 1041-1046, 2010. (Número Especial)

BARIZON, R. R. M.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Sorção e dessorção do imazaquim em solos com diferentes características granulométricas, químicas e mineralógicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 695-703, 2005.

BUNDTI, A. C.; AVILA, L. A.; PINTO, J. J. O.; SANTOS, T. T.; AGOSTINETTO, D.; MARTINS, K. Transporte ascendente da mistura formulada de imazethapyr e imazapic em resposta à profundidade do lençol freático. **Ciência Rural**, v. 43, n. 9, p. 1597-1604, 2013.

BRESNAHAM, G. A.; KOSKINEN, W. C.; DEXTER, A. G.; LUESCHEN, W. E. Influence of soil pH-sorption interactions on imazethapyr carry-over. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 5, p. 1929-1934, 2000.

DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GUERRA, N. Resíduos de herbicidas utilizados na cultura da soja sobre o milho cultivado em sucessão. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 86-91, 2012.

BRIGHENTI, A. M.; MORAES, V. J.; OLIVEIRA Jr, R. S.; GAZZIERO, D. L. P.; BARROSO, A. L. L.; GOMES, J. A. Persistência e fitotoxicidade de herbicidas aplicados na soja sobre o girassol em sucessão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.4, p.559-565, 2002.

DAS, A. C.; DEBNATH, A.; MUKHERJEE, D. Effect of the herbicides oxadiazon and oxyfluorfen on phosphates solubilizing microorganisms and their persistence in rice fields. **Chemosphere**, v. 53, n. 3, p. 217-221, 2003.

DORES, E. F. G. C.; SPADOTTO, C. A.; WEBER, O. L. S.; CARBO, L.; VECCHIATO, A. B.; PINTO, A. A. Environmental behaviour of metolachlor and diuron in a tropical soil in the central region of Brazil. **Water Air Soil Pollut**, v. 197, n. 1, p. 175-183, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ESTÉVEZ, M. A.; PERIAGO, E. L.; CARBALLO, E. M.; GÁNDARA, J. S.; MEJUTO, J. C.; RÍO, L. G. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 123, n. 4, p. 247-260, 2008.

FIRMINO L. E.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R.; TIBURCIO, R. A. S. Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 395-402, 2008.

GERSTL, Z. An update on the Koc concept in regard to regional scale management. **Crop Protection**, v. 19, p. 643-648. 2000.

GROSH, M.; SANTOS, F. M.; MARCHEZAN, E.; MASSONI, P. F.; AROSEMA, D. R.; AVILA, L. A. Residual da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sobre azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) cultivado em sucessão ao arroz tolerante. **Ciência Rural**, v. 38, n. 6, p. 1754-1757, 2008.

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

HOAGLAND, D.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. California Agriculture Experimental Station Circular, 1950. 347 p.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA Jr, R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA, M. F. Persistência da atividade biológica de imazaquin e imazethapyr aplicados em duas épocas do ano. **Acta Scientiarum**, v. 22, n. 4, p. 993-997, 2000.

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

KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M.; MASSONI, P. F. S.; SARTORI, G. M. S. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009b.

LI, H.; SHENG, G.; TEPPEM, B. J.; JOHNSTON, C. T.; BOYD, S. A. Sorption and desorption of pesticides by clay minerals and humic acid-clay complexes. **Soil Science Society of American Journal**, v. 67, p. 122-131, 2003.

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

MARTINI L. F. D.; AVILA, L. A.; SOUTO, K. M.; CASSOL, G. V.; REFATTI, J. P.; MARCHESAN, E.; BARROS, C.A.P. Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de Irrigação do arroz. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 185-193, 2011.

MONQUERO, P. A.; SILVA, P. V.; SILVA HIRATA, A. C.; TABLAS, D. C.; ORZARI, I. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010.

OLIVEIRA Jr. R.S.; KOSKINEN W. C.; FERREIRA F. A.; KHAKURAL, B. R.; MULLA, D. J.; ROBERT, P. C. Spatial variability of sorption/desorption of imazethapyr. **Weed Science**, v. 47, p. 243-248, 1999.

OLIVEIRA Jr. R. S.; KOSKINEN W. C.; FERREIRA F. A. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. **Weed Research**, v. 41, p. 97-110, 2001.

OLIVEIRA, M. F.; COLONNA, I.; PRATES, H. T.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; OLIVEIRA JR., R. S. Sorção do herbicida imazaquin em Latossolo sob plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 8, p. 787-793, 2004.

- OTTIS, B. V.; CHANDLER, J. M.; MCCAULEY, G. N. Imazethapyr application methods and sequences for imidazolinone-tolerant rice (*Oryza sativa*). **Weed Technology**, v. 17, n. 3, p. 526-533, 2003.
- PINTO, J. J. O.; NOLDIN, J. A.; PINHO, C. F.; ROSSI, F.; GALON, L.; ALMEIDA, G. F. Atividade residual de (imazethapyr + imazapic) para sorgo granífero (*sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 1015-1024, 2009.
- PINTO, J. J. O.; NOLDIN, J. A.; SOUSA, C. P.; AGOSTINETTO, D.; PIVETA, L.; DONIDA, A. Atividade residual de imazethapyr + imazapic em arroz semeado em rotação com o arroz clearfield®. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 205-216, 2011.
- SEEFELDT, S. S.; JENSEN, S. E.; FUERST, E. P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationship. **Weed Technology**, v. 9, n. 2, p. 218-227, 1995.
- SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.
- SI, Y.; ZHANGA, J.; WANGB, S.; ZHANGA, L.; ZHOU, D. Influence of organic amendment on the adsorption and leaching of ethametsulfuron-methyl in acidic soils in China. **Geoderma**, v. 130, n. 1, p. 66-76, 2006.
- SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO [SOSBAI]. **Arroz irrigado: recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre: SOSBAI, 2010, 188 p.
- SOUZA, A. P. **Atividade de oxyfluorfen, 2,4-D e glyphosate em solos de diferentes texturas na presença e na ausência de composto orgânico**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1994.
- STÜRMER, S. L. K. **Infiltração de água em neossolos regolíticos do rebordo do planalto do rio grande do sul**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2008.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina, PR, 2011. 697 p.
- VILLA, S. C. C.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A.; MASSONI, P. F. S.; TELO, G. M.; MACHADO, S. L. O.; CAMARGO, E. R. Arroz tolerante à imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.

LIXIVIAÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADAS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO ARROZ

RESUMO

O conhecimento do comportamento de herbicidas no ambiente, sobretudo no solo, permite a predição de possíveis impactos de sua utilização. O potencial de impacto ambiental de um herbicida depende, dentre outros fatores de sua lixiviação para camadas mais profundas do perfil do solo, onde a taxa de degradação da molécula química é reduzida, aumentando sua persistência e possibilidade de contaminar aquíferos subterrâneos. Neste trabalho avaliou-se por método biológico a lixiviação da mistura comercial do imazethapyr e imazapic e, também, em aplicações isoladas destes herbicidas em três solos do estado do Tocantins. Para isso, foram conduzidos três experimentos, sendo cada ensaio num tipo de solo (Plintossolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico). Os herbicidas foram aplicados no topo das colunas de PVC; simulando-se, 24 h após, uma chuva de 80 mm. Após a drenagem as colunas foram colocadas na posição horizontal removendo-se a tampa lateral das mesmas. Em seguida semeou-se o sorgo (*Sorghum vulgare*) cultivar BRS 655 como espécie bioindicadora da presença do herbicida. Os sintomas de intoxicação e a massa da matéria seca das plântulas indicadoras foram avaliados aos 21 dias após emergência. Os herbicidas imazethapyr e imazapic isolados e em mistura comercial apresentaram de média a alta lixiviação nos solos avaliados. Maior lixiviação foi observada na mistura comercial e no imazethapyr aplicado de forma isolada. Os atributos do solo, tais como o pH, textura e óxidos de ferro afetaram o processo de lixiviação dos herbicidas. Considerando que os herbicidas imazethapyr e imazapic apresentam longa persistência no solo, concluiu-se que existe alto risco de contaminação de corpos de águas por estes herbicidas quando aplicados nos solos avaliados.

Palavras-chave: mobilidade, imazapic, imazethapyr, only®.

LEACHING OF IMIDAZOLINONES IN SOILS UNDER CLEARFIELD SYSTEM OF RICE CULTIVATION

ABSTRACT

The knowledge of herbicide behavior in the environment, in particular soil, allows the prediction of possible impacts of its use. The potential environmental impact of a herbicide depends, among other factors leaching to deeper layers of the soil profile, where the molecule chemical degradation rate is reduced, increasing the possibility of persistence and contaminating underground aquifers. In this work we evaluated for biological leaching method the commercial mixture of imazethapyr and imazapic and also in isolated applications of these herbicides in three of Tocantins state land. For this, three experiments were conducted, each test in one soil type (Haplic Plinthosol, Oxisol and Epiaquic Haplustult). The herbicides were applied on top of PVC columns; simulating is, 24 hours after, a rain of 80 mm. After draining the columns were placed in a horizontal position by removing the side cover thereof. Then seeded sorghum (*Sorghum vulgare*) BRS 655 as a bioindicator species of herbicide treatments. Symptoms of intoxication and the dry matter of the indicator seedlings were evaluated at 21 days after emergence. The herbicides imazethapyr and imazapic isolated and commercial mixture showed average to high leaching in soils,. Greater leaching was observed in the commercial mixture and imazethapyr applied in isolation. The soil properties such as pH, texture and iron oxides affect the process of leaching of herbicide. Whereas imazapic and imazethapyr herbicide have long persistence in the soil, it is concluded that there is a high risk of contamination of water specimens by these herbicides when applied in the evaluated soils.

Keywords: mobility, imazapic, imazethapyr, only[®].

INTRODUÇÃO

O uso de produtos fitossanitários é prática comum na agricultura, visando à proteção das plantas cultivadas e à expressão do máximo potencial produtivo da espécie de interesse. No entanto, o uso inadequado desses compostos pode ocasionar a

contaminação do solo e de mananciais hídricos. Diversas pesquisas têm demonstrado que, entre os defensivos agrícolas utilizados na agricultura, os herbicidas são os mais frequentemente encontrados em águas superficiais e subsuperficiais (LAPWORTH; GOODDY, 2006; SILVA et al., 2009, 2011).

Quando os herbicidas são aplicados no solo, é necessário que ocorra sua lixiviação alguns centímetros abaixo da sua superfície, para melhor ação no controle de plântulas em germinação (OLIVEIRA; BRIGHENT, 2011). Para os herbicidas carregados a maiores profundidades do perfil do solo, pode haver aumento do efeito residual ou persistência, em função da menor atividade microbiana, devido às menores concentrações de O₂, considerada a principal via de degradação da maioria dos herbicidas (DAS et al., 2003).

A lixiviação dos herbicidas ao longo do perfil do solo é influenciada por diversos fatores relacionados com as características físico-químicas da molécula utilizada, bem como do solo aplicado, além das condições climáticas do local. Entre elas, destaca-se a solubilidade da molécula, a matéria orgânica do solo, o pH e o índice de precipitação pluvial (PRATA et al., 2003).

Os herbicidas do grupo das imidazolinonas controlam amplo espectro de plantas daninhas, incluindo gramíneas, ciperáceas e latifoliadas (VILA et al., 2006). O controle é proporcionado pela inibição da enzima acetolactato sintetase (ALS), sendo esta essencial no processo de síntese de aminoácidos de cadeias ramificadas (TAN et al., 2006). Nos últimos anos, com o desenvolvimento do sistema Clearfield[®] de arroz irrigado, a utilização desses herbicidas nessa cultura tem-se intensificado, sobretudo da mistura comercial de imazethapyr e imazapic. Ambas as moléculas apresentam a característica de serem persistentes no solo, sendo muito solúveis em água e suscetíveis à lixiviação (MONQUERO et al., 2010; MARTINI et al., 2011).

Para monitorar o potencial de lixiviação de um herbicida no solo, é utilizado como técnica o lisímetro associado à Cromatografia Líquida de Alta Eficiência- CLAE (SOUZA et al., 2008; QUEIROZ et al., 2011). Todavia, essa técnica de monitoramento é extremamente cara e, portanto, pouco adotada no Brasil. Uma técnica alternativa é a utilização de colunas de solo (INOUE et al., 2007; MELO et al., 2010) em conjunto com a semeadura de plantas sensíveis ao herbicida testado, de forma que os resíduos possam ser evidenciados por meio da alteração das características morfofisiológicas das plantas bioindicadoras, em colunas preenchidas com solos de comprimento fixo.

Dessa forma, considerando a relevância do assunto e a carência de informações sobre a lixiviação desses compostos em condições tropicais, objetivou-se neste estudo estimar o potencial de lixiviação do imazethapyr e do imazapic, isolados e em mistura comercial, em três solos do Estado do Tocantins através do método biológico, por meio de bioensaios.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três experimentos em casa de vegetação pertencente à Universidade Federal de Viçosa. Cada experimento foi composto por um tipo de solo, coletado em diferentes localidades produtoras de arroz: Experimento 1: Plintossolo Háptico (FX), Experimento 2: Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Experimento 3: Gleissolo Háptico (GX), provenientes, respectivamente, de Formoso do Araguaia, Gurupi e Lagoa da Confusão, Estado do Tocantins. Todas as amostras de solo foram coletadas em áreas sem histórico da aplicação de herbicidas na profundidade de 0 a 20 cm, peneiradas em malhas de 4 mm e, posteriormente, caracterizadas química e fisicamente (Tabelas 1 e 2).

Para avaliar a lixiviação dos herbicidas, foram preparadas colunas de PVC de 10 cm de diâmetro por 50 cm de comprimento, preenchidas com os solos correspondentes a cada experimento. As colunas foram previamente preparadas e parafinadas no seu interior, para evitar o escorrimento lateral da água. Todas as colunas foram marcadas e seccionadas a cada 5 cm de distância, com tampa lateral removível. Após o seu preenchimento com as amostras de solo, estas foram saturadas com água, para eliminar as bolhas de ar presas nos poros. A saturação foi alcançada colocando-se a coluna dentro de um recipiente (caixa-d'água) com até 80% da altura desta, por um período de 48 horas. Posteriormente, as colunas foram deixadas na posição vertical, vedando-se a parte superior com papel-alumínio. Depois disso, foram deixadas em repouso por 72 horas, para drenar o excesso de água.

Os experimentos foram realizados no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcela subdividida. As parcelas foram constituídas dos herbicidas avaliados (imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial), e as subparcelas, pelas profundidades do solo (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 e 45-50 cm), mais uma testemunha sem aplicação de herbicidas.

Tabela 1 - Resultados das análises química e físico-químicas das amostras dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Solo	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	(t)	V	m
		(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)					(%)	
FX	6,1	3,5	27	3,39	1,35	0,00	3,0	4,8	61,6	0,0
LVA	5,7	0,8	79	0,99	0,52	0,00	4,7	1,7	26,7	0,0
GX	5,2	1,3	82	1,69	0,75	0,57	5,2	3,2	33,8	17,7
		Fe Oxalato		Fe Ditionito			MO			
		(dag kg ⁻¹)								
FX		0,10		1,29			2,22			
LVA		0,14		2,19			3,00			
GX		0,56		0,83			2,35			

Análises realizadas segundo metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

Tabela 2 - Resultados das análises físicas e classificação textural das amostras dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Solo	A. Grossa	A. Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	(dag kg ⁻¹)				
FX	17	30	16	37	Argilo Arenosa
LVA	32	23	6	39	Argilo Arenoso
GX	0	32	45	23	Franco

O imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial, foram aplicados no topo das colunas, nas doses de 75 e 25 g ha⁻¹, respectivamente. Para isso, utilizou-se um pulverizador pressurizado a CO₂ comprimido, equipado com barra com dois bicos TT11002, espaçados de 0,50 m, mantidos em pressão de 25 lb pol⁻², com volume de calda de 150 L ha⁻¹. Doze horas após as aplicações dos tratamentos, com as colunas ainda na posição vertical, foi realizada a simulação da chuva, com aplicação de uma lâmina de 80 mm com intensidade variada, em função do tipo de solo: Plintossolo Háplico (3,5 h), Latossolo Vermelho-Amarelo (3,0 h) e Gleissolo Háplico (12,0 h). Para aferição da precipitação pluvial, foram instalados pluviômetros acoplados às paredes laterais das colunas.

As colunas permaneceram por 72 horas na posição vertical, sendo em seguida colocadas na posição horizontal. Nessa ocasião, fez-se a abertura da tampa lateral e o seccionamento do solo de cada coluna a cada 5 cm, de forma a evitar que o sistema radicular das plantas indicadoras crescesse além de um segmento. Posteriormente,

realizou-se a semeadura de cinco sementes de sorgo (*Sorghum vulgare*), cultivar 655, por segmento, como planta indicadora da presença dos herbicidas. A umidade dos solos nas colunas, durante a realização desses experimentos, foi mantida por meio de irrigações diárias, mantendo-se o solo próximo à capacidade de campo. Para manter o bom crescimento das plantas indicadoras, estas foram irrigadas com solução nutritiva completa de Hoagland e Arnon (1950). Aos dez dias após emergência (DAE) foi realizado o desbaste, permanecendo apenas três plantas em cada segmento.

Aos 21 DAE da espécie indicadora, foram feitas as avaliações de intoxicação (escala visual variando de 0 a 100, em que 0 significa planta sem sintoma e 100 a morte da planta). Posteriormente, as plantas foram seccionadas rente ao solo e acondicionadas em sacos de papel. Estes foram levados para secagem em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 2 °C), até atingir massa constante, sendo determinada a massa da matéria seca das plantas em balança com precisão de 0,0001 g. Os valores de massa da matéria seca (MS) das plantas de sorgo foram transformados para porcentagem em relação à MS da testemunha, adotando-se 100% para MS da testemunha.

Para a interpretação dos resultados, os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão. Na escolha dos modelos foram levados em consideração a resposta biológica, a significância dos coeficientes de regressão e os coeficientes de determinação. Quanto ao fator qualitativo (herbicidas), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade de erro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os experimentos (solos), ocorreu interação significativa entre os fatores profundidade do solo e herbicidas avaliados, nas variáveis matéria seca e intoxicação das plantas. Desse modo, realizou-se o desdobramento das variáveis, estudando-se os três herbicidas em cada profundidade da coluna e as dez profundidades em cada herbicida.

Plintossolo Háplico (FX)

A aplicação da mistura dos herbicidas imazethapyr e imazapic e a do primeiro isoladamente promoveram os maiores índices de intoxicação das plantas bioindicadoras nas camadas de 0-5 e 5-10 cm do Plintossolo Háplico-FX (Tabela 3). O imazapic, com

menor dose de aplicação, foi o que apresentou menor intoxicação do sorgo no segmento de 10-15 cm; a partir dessa profundidade, não se constatou presença desse herbicida no perfil solo. Observou-se também que a mistura comercial promoveu maior intoxicação das plantas até a profundidade de 20-25 cm, não sendo lixiviada para as demais profundidades, bem como a do imazathapyr em aplicação isolada.

Tabela 3 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Plintossolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	Intoxicação (%)		
0-5	90,0 A	86,2 B	77,5 B
5-10	83,7 A	83,7 A	58,7 B
10-15	88,2 A	78,0 B	40,0 C
15-20	87,5 A	60,0 B	0,0 C
20-25	55,0 A	20,5 B	0,0 C
25-30	0,0 A	0,0 A	0,0 A
30-35	0,0 A	0,0 A	0,0 A
35-40	0,0 A	0,0 A	0,0 A
40-45	0,0 A	0,0 A	0,0 A
45-50	0,0 A	0,0 A	0,0 A
CV (%) da parcela	18,9		
CV (%) da subparcela	14,8		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Martini et al. (2011) observaram que a mistura comercial de imazethapyr e imazapic concentrou-se na camada de 5-20 cm de profundidade no perfil de um Planossolo Hidromórfico Eutrófico Arênico submetido aos manejos de irrigação contínuo, intermitente e banho. Esses autores ressaltam que, independentemente de como a irrigação é manejada, ela promove movimentação vertical do herbicida.

A menor lixiviação do imazapic isolado (Figura 1) pode ser atribuída à sua menor dose de aplicação (25 g ha⁻¹). Inoue et al. (2007), trabalhando com o efeito de dose na lixiviação do imazapic, constataram que houve movimentação aparente desse herbicida até a camada de 10-15 cm para a dose de 65 g ha⁻¹ e até 15-20 cm para a dose

de 130 g ha⁻¹. Esse comportamento indica que a lixiviação do imazapic é influenciada pela dose aplicada.

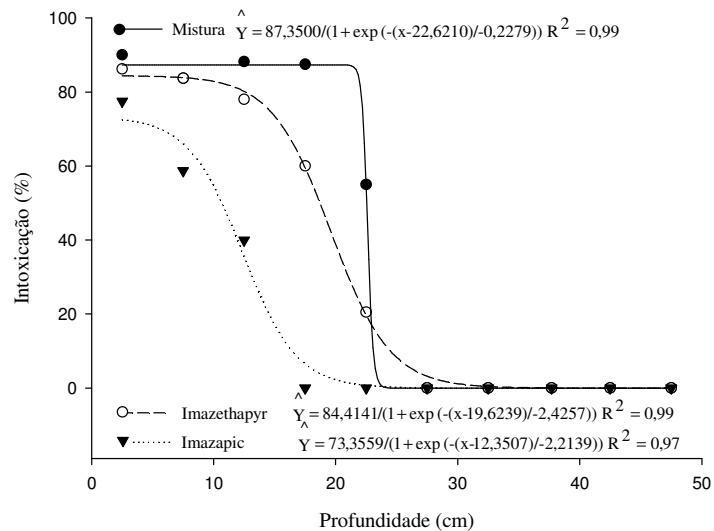


Figura 1 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Plintossolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

Os herbicidas imazethapyr e imazapic apresentam características físico-químicas muito semelhantes (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). Ambas as moléculas possuem capacidade de dissociação eletrolítica (pKa) de 3,9, o que os caracteriza como ácidos fracos (SENSEMAN, 2007). Em solos com valores de pH acima do pKa, como observado no Plintossolo Háplico (Tabela 1), essas moléculas encontram-se predominantemente na forma ionizada, ou seja, com carga residual negativa. Isso faz com que o composto permaneça na solução do solo e, portanto, tenha maior potencial para contaminar águas subterrâneas.

No acúmulo da matéria seca de sorgo em relação à testemunha (Tabela 4 e Figura 2), observaram-se resultados semelhantes aos constatados na avaliação visual de intoxicação, sendo esta mais sensível. É comum, em curto intervalo de tempo, as plantas apresentarem sintomas evidentes de intoxicação por herbicidas sem alterar sua taxa de crescimento. Além disso, subdoses dos herbicidas podem afetar positivamente, pelo fenômeno da hormese, o acúmulo de matéria seca das plantas, podendo tornar esta variável pouco precisa (FREITAS et al., 2010).

Tabela 4 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Plintossolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
0-5	9,5 B	10,2B	37,7 A
5-10	19,5 B	22,0 B	58,7 A
10-15	27,5 B	29,2 B	74,0 A
15-20	44,0 C	55,7 B	99,7 A
20-25	63,2 C	89,2 B	99,7 A
25-30	98,5 A	100,0 A	99,5 A
30-35	100,0 A	100,0 A	99,5 A
35-40	100,0 A	100,0 A	100,0 A
40-45	99,2 A	100,0 A	100,0 A
45-50	99,2 A	99,5 A	100,0A
CV (%) da parcela	9,3		
CV (%) da subparcela	6,5		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O carregamento dos herbicidas no perfil do solo tem implicações diretas na contaminação das águas subsuperficiais. Quando estes são lixiviados das camadas superficiais do solo, onde há maior teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, maior atividade microbiana, a sua persistência no ecossistema é aumentada (COSTA et al., 2000; SILVA et al., 2010). De fato, isso ocorre com os herbicidas do grupo das imidazolinonas, pois a degradação microbiana é a principal via de decomposição desses xenobióticos no solo (KRAEMER et al., 2009a). Assim, os resultados obtidos no Plintossolo Háplico sugerem que ambos os herbicidas estão sujeitos à lixiviação e que o imazethapyr presente na mistura comercial em maior concentração (75 g ha⁻¹) é a molécula com menor chance de ser encontrada em profundidades superiores a 15 cm, em razão da sua maior concentração.

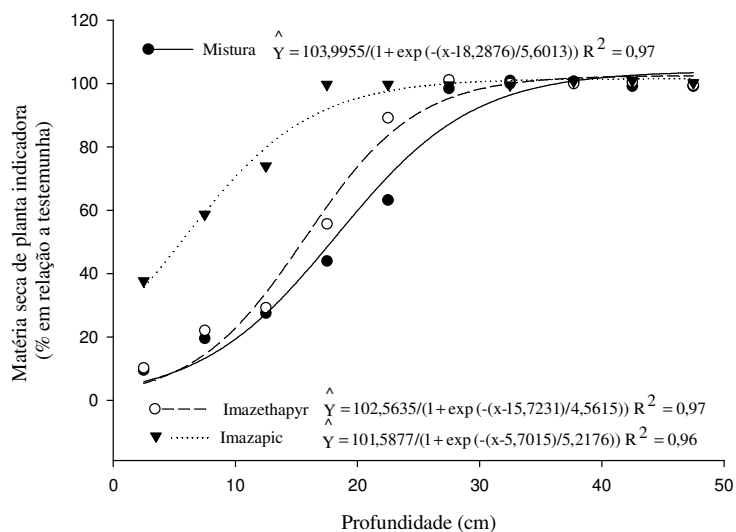


Figura 2 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Plintossolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

No experimento utilizando Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA, os valores médios de intoxicação da planta bioindicadora foram elevados na camada de 0-5 cm. A maior intoxicação foi verificada na mistura comercial de imazethapyr e imazapic, seguida do imazapic isolado, porém este não se diferenciou do imazethapyr isolado (Tabela 5).

Na profundidade de 5-10 cm, a intoxicação manteve-se elevada na mistura comercial e no imazethapyr isolado. Os mesmos resultados foram constatados no segmento de 10-15 cm, mostrando que a mistura e o imazethapyr proporcionaram maior intoxicação das plantas bioindicadoras e que o imazapic foi menos lixiviado no perfil do solo. A partir do quarto segmento da coluna (Tabela 5 e Figura 3), não foram evidenciados sintomas de intoxicação com o imazapic; no entanto, a mistura e o imazethapyr isolado apresentaram alta porcentagem de intoxicação nas plantas de sorgo. A maior intoxicação foi verificada na mistura comercial de imazethapyr e imazapic. Na mistura comercial e no imazethapyr isolado, na profundidade de 20-25 cm, a intoxicação mostrou valores inferiores a 50%; a maior intoxicação neste segmento foi proporcionada pela aplicação da mistura dos herbicidas. Apesar de apresentar valores de

intoxicação capazes de provocar redução na produção de matéria seca das plantas de sorgo, verificou-se que houve redução significativa na intoxicação quando se comparou cada herbicida nas diferentes profundidades (Figura 3), a partir do terceiro segmento para o imazapic e do quinto segmento para a mistura comercial e o imazethapyr isolado.

Tabela 5 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Latossolo Vermelho-Amarelo após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
Intoxicação (%)			
0-5	81,2 A	70,0 B	74,0 AB
5-10	79,2 A	77,5 A	52,5 B
10-15	77,0 A	77,5 A	29,5 B
15-20	76,2 A	60,0 B	0,0 C
20-25	41,2 A	26,2 B	0,0 C
25-30	6,2 A	0,0 A	0,0 A
30-35	0,0 A	0,0 A	0,0 A
35-40	0,0 A	0,0 A	0,0 A
40-45	0,0 A	0,0 A	0,0 A
45-50	0,0 A	0,0 A	0,0 A
CV (%) da parcela	16,3		
CV (%) da subparcela	19,5		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A intoxicação das plantas na profundidade de 25-30 cm só foi observada com a mistura comercial de imazethapyr e imazapic, porém este não se diferenciou dos demais tratamentos (Tabela 5). Isso sugere que o uso da mistura de imazethapyr e imazapic em áreas de cultivo do arroz Clearfield[®] está sujeito à contaminação de águas subterrâneas e que o imazethapyr presente na mistura em maior dose é possível de ser encontrado em maiores profundidades, quando comparado ao imazapic. Não se detectou presença dos herbicidas imazethapyr e imazapic em mistura comercial e isolados a partir do sétimo segmento (Tabela 5 e Figura 3).

A acentuada lixiviação verificada no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) neste experimento deve-se possivelmente à baixa capacidade de sorção, em razão do pH (5,7) e do baixo teor de Fe-oxálico. Aliado a esses fatores, segundo Kraemer et al. (2009a), por se tratar de moléculas ionizáveis, o imazethapyr e o imazapic podem apresentar-se

em duas formas quanto à sua carga líquida. Abaixo de pH 3,9, a forma predominante é a molecular, na qual as moléculas apresentam carga líquida zero; quando o pH do solo se aproxima da neutralidade, passa a predominar a forma aniônica, diminuindo a força de atração entre as moléculas de herbicida e as cargas predominantes no solo. Isso pode resultar em menor sorção do herbicida e, conseqüentemente, maior potencial de lixiviação dos compostos.

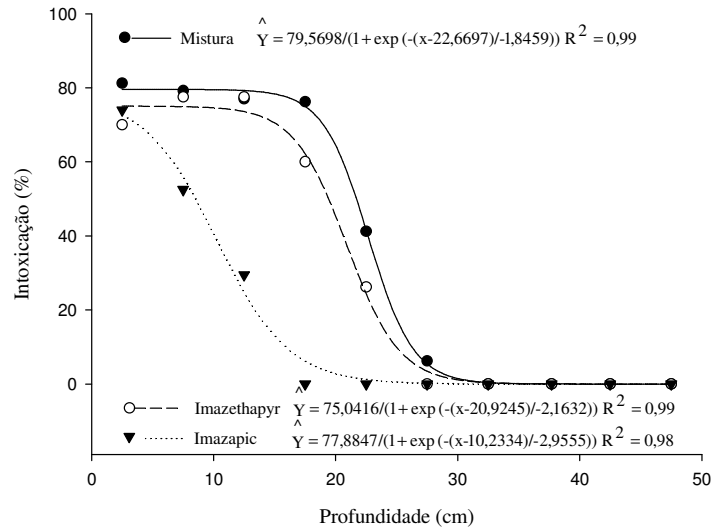


Figura 3 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Latossolo Vermelho-Amarelo após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

Outro fato importante na movimentação desses herbicidas, nesse solo, é a textura argiloarenosa, que facilita a percolação da água no perfil e permite maior lixiviação descendente do imazethapyr e imazapic em mistura e isolados, por fluxo de massa. Firmino et al. (2008a) observaram que o imazapyr, molécula do mesmo grupo do imazethapyr e imazapic, apresentou lixiviação diferenciada entre diferentes solos, sendo a maior em solo com textura arenosa, em relação ao solo muito argiloso. Assim, em se tratando de herbicidas derivados de ácidos fracos, como o imazethapyr e o imazapic, em condições de chuvas ou irrigações intensas, uma lixiviação significativa pode ocorrer. Isso pode afetar tanto a atividade do herbicida, com relação ao controle de plantas daninhas, quanto sua persistência no solo e no ambiente, além de seu potencial de impacto em mananciais aquáticos subterrâneos.

Quando se estudou a porcentagem de matéria seca em relação à testemunha no LVA (Tabela 6 e Figura 4), observou-se o mesmo comportamento da porcentagem de intoxicação. A mistura comercial e o imazethapyr isolado apresentaram maior movimentação no perfil do solo, atingindo a profundidade de 25 cm (Figura 4), e o imazapic concentrou-se na camada de 5-15 cm de profundidade, demonstrando menor lixiviação no LVA.

Tabela 6 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Latossolo Vermelho-Amarelo após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
0-5	19,5 B	15,5 B	38,2 A
5-10	34,5 B	30,2 B	59,5 A
10-15	42,2 B	47,2 B	85,0 A
15-20	55,7 B	57,7 B	100,0 A
20-25	70,2 C	84,2 B	100,0 A
25-30	96,0 A	98,2 A	100,0 A
30-35	99,7 A	100,0 A	99,7 A
35-40	100,0 A	99,7 A	99,2 A
40-45	100,0 A	100,0 A	100,0 A
45-50	100,0 A	100,0 A	100,0 A
CV (%) da parcela	5,1		
CV (%) da subparcela	6,7		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em estudo com a mistura de imazethapyr e imazapic em áreas de plantio direto (PD) e convencional (PC), Kraemer et al. (2009b) encontraram resultados semelhantes aos deste estudo, em que o imazethapyr foi detectado até 20 cm de profundidade, independentemente do sistema de cultivo. Esses autores ressaltam que a concentração de imazethapyr na superfície do solo (0-5 cm) é maior no sistema convencional, quando comparado com o PD. Uma das possíveis causas dessa concentração no PC está relacionada com a maior evapotranspiração da água do solo neste sistema, quando comparado com o PD. Vale ressaltar que nesse trabalho os autores somente quantificaram o imazethapyr através da cromatografia líquida de alta eficiência-HPLC.

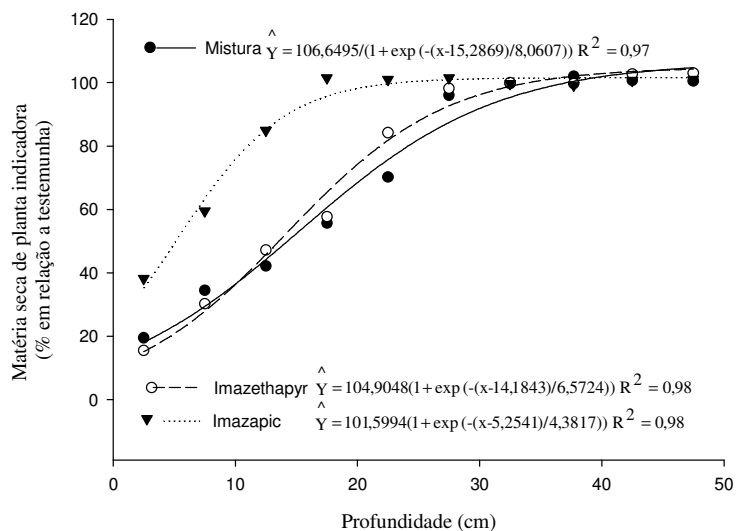


Figura 4 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Latossolo Vermelho-Amarelo após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

A menor lixiviação do imazapic no solo (Figura 4) pode ser atribuída à menor dose de aplicação, visto que em trabalho realizado por Monquero et al. (2010) em solo com características físicas e químicas semelhantes às do LVA, com chuva simulada (80 mm) e dose de aplicação do imazapic (210 g ha^{-1}) 8,4 vezes maior que a aplicada neste trabalho, o herbicida lixiviou até a profundidade de 30 cm no perfil do solo.

A bioatividade dos herbicidas do grupo das imidazolinonas e o seu movimento no solo são grandemente influenciados por inúmeros fatores ambientais. Entre esses fatores, tem-se demonstrado que a textura, o tipo de argila, a umidade e o pH influenciam diretamente a sorção e, conseqüentemente, a mobilidade dessas moléculas no perfil do solo (AHAMAD et al., 2001; AHMAD; RAHMAN, 2009). Monquero et al. (2010) observaram maior mobilidade do imazapic em um Latossolo Vermelho Distroférico com pH 6,0, em comparação ao mesmo solo com pH 4,7. Isso era esperado, já que os herbicidas do grupo das imidazolinonas, que predominam na forma aniônica, como mencionado, em pH de 7 ± 2 são repelidos pelas cargas negativas dos colóides minerais e orgânicos do solo. Em pH de 6,0 o imazapic apresenta-se muito dissociado, e não é esperada sua sorção significativa se o mecanismo de adsorção for exclusivamente iônico.

Os resultados de intoxicação e de MS (Tabelas 5 e 6, respectivamente) demonstraram que o herbicida composto pela mistura comercial de imazethapyr

e imazapic concentrou-se na camada de 0-25 cm de profundidade no LVA, apresentando potencial de contaminação do lençol freático nas doses estudadas.

Gleissolo Háplico (GX)

No experimento com o Gleissolo Háplico, a avaliação da intoxicação das plantas bioindicadoras, na camada 0-5 cm, mostrou alta porcentagem de intoxicação na mistura comercial, seguida do imazethapyr isolado (Tabela 7). O imazapic apresentou menor intoxicação nessa profundidade quando comparado aos demais herbicidas. Na profundidade de 5-10 cm, houve redução dos níveis de intoxicação das plantas de sorgo, e a maior intoxicação foi verificada quando se aplicou o imazethapyr isolado. A partir do terceiro segmento das colunas, não foram observados sintomas visuais de intoxicação das plantas (Tabela 7 e Figura 5), o que se deve ao fato de que, no Gleissolo Háplico com textura franca, os herbicidas em estudo concentram-se na camada superficial do solo, com menor risco de contaminação do lençol freático.

Tabela 7 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Gleissolo Háplico Amarelo após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	Intoxicação (%)		
0-5	94,00 A	92,5 A	67,5 B
5-10	16,25 B	37,5 A	5,0 C
10-15	0,0 A	0,0 A	0,0 A
15-20	0,0 A	0,0 A	0,0 A
20-25	0,0 A	0,0 A	0,0 A
25-30	0,0 A	0,0 A	0,0 A
30-35	0,0 A	0,0 A	0,0 A
35-40	0,0 A	0,0 A	0,0 A
40-45	0,0 A	0,0 A	0,0 A
45-50	0,0 A	0,0 A	0,0 A
CV (%) da parcela	69,0		
CV (%) da subparcela	79,0		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

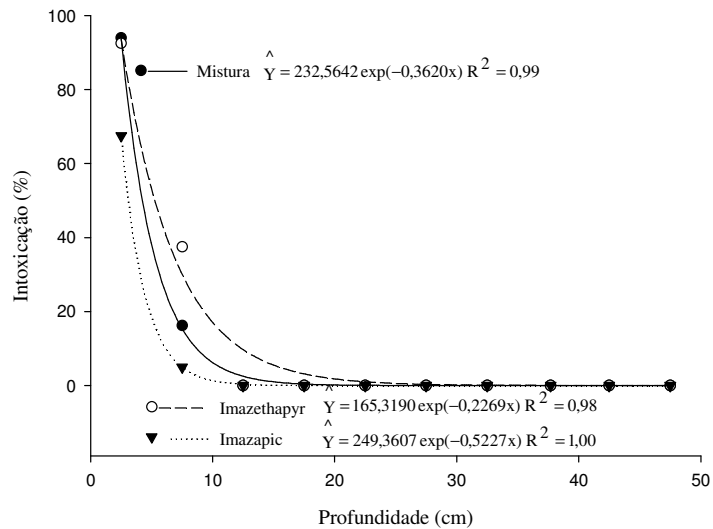


Figura 5 - Intoxicação de plantas de sorgo cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Gleissolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

Além do baixo pH verificado no solo GX (Tabela 1), outros fatores podem ter contribuído para a menor movimentação dos herbicidas no perfil, destacando-se maiores valores dos teores de óxidos de ferro e da matéria orgânica do solo (Tabela 1). Em pH próximo ao encontrado no GX (5,2), a dissociação do íon H^+ do grupo carboxílico e do anel da imidazolinona, presentes na molécula desses herbicidas, pode ser favorecida. Nessa condição, as moléculas passam a apresentar predominantemente cargas líquidas negativas, levando-o a interagir com sítios positivos da matéria orgânica e de cátions metálicos, como os óxidos de ferro. Segundo Firmino et al. (2008b), esse fato aumentaria a adsorção desses herbicidas com as superfícies de argilas ricas em óxidos de ferro, diminuindo assim a movimentação do herbicida no solo e aumentando sua sorção.

A movimentação descendente dos herbicidas na matriz do solo junto com a água é regulada pelas características físicas e químicas do solo; a textura arenosa facilita a percolação desse veículo, arrastando consigo a molécula do herbicida, como discutido no LVA. O Gleissolo apresenta textura franca, com 45 dag kg^{-1} de silte (Tabela 2). Essa fração tem baixo potencial para formação de agregados; associada ao tamanho pequeno e uniforme, ela tende a se deslocar para camadas mais profundas do solo, onde pode causar impedimento físico dos poros (STÜRMER, 2008). Esse impedimento pode acarretar menor percolação de água na matriz do solo e, conseqüentemente, menor lixiviação dos herbicidas no perfil de solos com essa característica. De acordo com

Rossi et al. (2005), solos com textura arenosa tendem a apresentar maior lixiviação do que os siltosos ou argilosos, em razão da maior percolação da água no perfil do solo.

Quando se avaliou a porcentagem de matéria seca das plantas de sorgo em relação à testemunha no GX, observou-se que ambos os herbicidas concentraram-se nas camadas superficiais do solo e que a maior redução da matéria seca (MS) foi verificada na camada de 0-5 cm (Tabela 8). A mistura comercial e o imazethapyr isolado foram os que apresentaram o menor acúmulo de MS (Figura 6). Na profundidade de 5-10 da coluna, não houve redução do acúmulo de MS com a aplicação do imazapic, demonstrando que este composto não se movimentou no perfil do solo, concentrando-se somente na sua superfície (Figura 6). A partir da profundidade de 10-15, houve redução mínima da MS com a mistura comercial; no entanto, não se diferenciou estatisticamente das demais profundidades, as quais não apresentaram essa redução.

Tabela 8 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Gleissolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva

Profundidade na coluna (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
0-5	16,5 B	14,5 B	45,2 A
5-10	85,5 B	88,2 B	100,0 A
10-15	98,2 A	100,0 A	100,0 A
15-20	99,7 A	100,0 A	98,7 A
20-25	100,0 A	99,7 A	100,0 A
25-30	99,2 A	100,0 A	100,0 A
30-35	100,0 A	97,0 A	100,0 A
35-40	99,7 A	100,0 A	99,0 A
40-45	100,0 A	100,0 A	100,0 A
45-50	100,0 A	99,7 A	100,0 A
CV (%) da parcela	2,4		
CV (%) da subparcela	4,6		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados evidenciam que, no GX, a movimentação dos herbicidas é reduzida e que a textura franca dele, associada aos maiores valores de pH e concentrações de óxido de ferro, foram os fatores que mais restringiram essa movimentação.

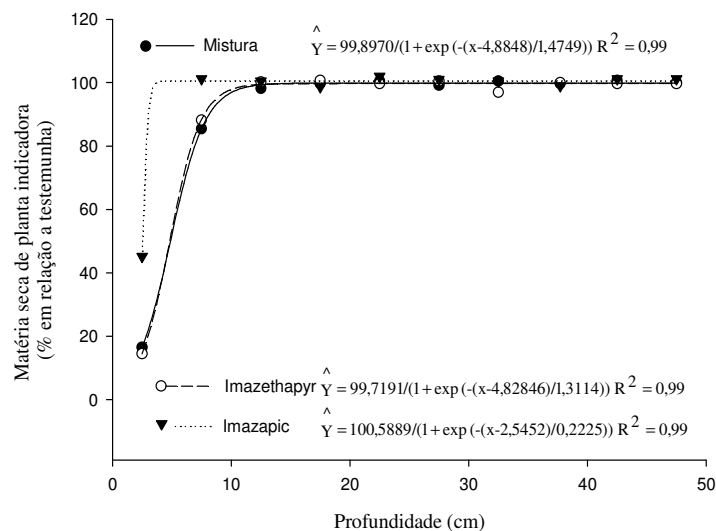


Figura 6 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, cultivadas em diferentes profundidades da coluna preenchida com Gleissolo Háplico após a aplicação da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e de cada um isoladamente, submetidas à precipitação de 80 mm de chuva.

Assim, os resultados obtidos nos três experimentos (Plintossolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico) sugerem que ambos os herbicidas (imazethapyr e imazapic), aplicados em mistura comercial ou isolados, nas doses recomendadas, estão sujeitos à lixiviação e que houve tendência de interferência de pH, textura e óxidos de ferro nesse processo. A maior lixiviação dos herbicidas nos três experimentos, em ordem decrescente, foi: mistura comercial de imazethapyr e imazapic, imazethapyr e imazapic.

LITERATURA CITADA

AHMAD, R.; RAHMAN, A. Sorption characteristics of atrazine and imazethapyr in soils of New Zealand: importance of independently determined sorption data. **Journal Agricultural Food Chemistry**. v. 57, p. 10866-10875, 2009.

AHMAD, R.; KOOKANA, R.S.; ALSTON, A.M. Sorption of ametryn and imazethapyr in twenty-five soils from Pakistan and Australia. **Journal Environmental Science and Health**, v. 2, p. 143-60, 2001.

COSTA, M. A.; MONTEIRO, R. T. R.; TORNISIELO, V. L. Degradação de ametrina em Areia Quartzosa com adição de solo rizosférico de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 24, n. 1, p. 43-48, 2000.

DAS, A.C.; DEBNATH, A.; MUKHERJEE, D. Effect of the herbicides oxadiazon and oxyfluorfen on phosphates solubilizing microorganisms and their persistence in rice fields. **Chemosphere**, v. 53, n. 5, p. 217-221, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FIRMINO, L. E.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, L. R.; FERREIRA, F. A.; QUIRINO, A. L. S. Movimento do herbicida imazapyr no perfil de solos tropicais. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 223-230, 2008a.

FIRMINO, L. E.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R.; TIBURCIO, R. A. S. Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 395-402, 2008b.

FREITAS, F. C. L.; SILVA, A. A.; SILVA, L. O. C.; ROCHA, P. R. R.; GUIMARÃES, F. C. N.; FREITAS, M. A. M. Mobilidade do ametryn em solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 28., 2010, Ribeirão Preto. **Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas**, v. 1. p. 3284-3288, 2010.

HOAGLAND, D.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. California Agriculture Experimental Station Circular, 1950. 347 p.

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

KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M.; MASSONI, P. F. S.; SARTORI, G. M. S. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009a.

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

LAPWORTH, D. J.; GOODDY, D. C.; Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. **Environmental Pollution**, v. 144, n. 3, p. 1031-1044, 2006.

MARTINI L. F. D.; AVILA, L. A.; SOUTO, K. M.; CASSOL, G. V.; REFATTI, J. P.; MARCHESAN, E.; BARROS, C. A. P. Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de Irrigação do arroz. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 185-193, 2011.

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

MONQUERO, P. A.; SILVA, P. V.; SILVA HIRATA, A. C.; TABLAS, D. C.; ORZARI, I. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENT, A. M. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba-PR: Omnipax, 2011. p. 263-304.

PRATA, F.; CARDINALI, V. C. B.; LAVORENTI, A.; TORNISIELO, V. L.; REGITANO, J. B. Glyphosate sorption and desorption in soils with different phosphorous levels. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 1, p. 175-180, 2003.

QUEIROZ, G. M. P.; SILVA, M. R.; 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.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina, PR, 2011. 697 p.

ROSSI, C. V. S.; ALVES, P. L. C. A.; MARQUES JR., J. Mobilidade do sulfentrazone em Latossolo Vermelho e em Chernossolo. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 701-710, 2005.

SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.

SILVA, D. R. O.; AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; BUNDT, A. C. Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavouras de arroz irrigado. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 748-752, 2011.

SILVA, D. R. O.; AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; DAL MAGRO, T.; OLIVEIRA, E.; ZANELLA, R.; NOLDIN, J.A. Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2383-2389, 2009.

SILVA, F. A.; 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.

SOUZA, E. L. C.; FOLONI, L. L.; MANTOVANI, E. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Comportamento do tebuthiuron em solo de cultivo de cana-de-açúcar utilizando lisímetro de drenagem modificado. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 157-163, 2008.

STÜRMER, S. L. K. **Infiltração de água em Neossolos regolíticos do rebordo do planalto do Rio Grande do Sul**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2008.

TAN, S.; EVANS, R.; SINGH, B. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. **Amino Acids**, v. 30, n. 2, p. 195-204, 2006.

VILLA, S. C. C.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A.; MASSONI, P. F. S.; TELO, G. M.; MACHADO, S. L. O.; CAMARGO, E. R. Arroz tolerante a imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.

PERSISTÊNCIA DE IMIDAZOLINONAS EM SOLOS UTILIZADOS NO SISTEMA CLEARFIELD DE CULTIVO DE ARROZ

RESUMO

A mistura comercial dos herbicidas imazethapyr e imazapic tem sido utilizada visando o controle do arroz-vermelho e diversas outras espécies de plantas daninhas infestantes de cultivos de arroz irrigado, sistema esse denominado Clearfield. Contudo, sua utilização pode restringir a sucessão de culturas não tolerantes pela longa atividade residual. Diante disso, objetivou-se com este trabalho determinar a persistência do imazethapyr, imazapic e sua mistura em três solos do estado do Tocantins. Realizou-se três experimentos no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo cada um correspondente ao solo avaliado (Plintossolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico). Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcela subdividida, sendo nas parcelas alocados os herbicidas (imazethapyr e imazapic isolados e em mistura comercial) e nas subparcelas alocadas as 11 épocas de avaliação (1, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 dias após o tratamento (DAT)), além de uma testemunha sem aplicação. Constatou-se longo efeito residual do imazethapyr e da mistura comercial de imazethapyr e imazapic, independente do solo avaliado. Após 150 dias da aplicação dos herbicidas ou da mistura comercial, os seus resíduos no solo ainda inibiram aproximadamente 94% o acúmulo da massa da matéria seca das plantas indicadoras. Quando aplicado o imazapic na forma isolada observou-se maior acúmulo de matéria seca das plantas indicadoras indicando menor efeito residual desse herbicida nos solos, sendo este fato atribuído a menor dose aplicada desse herbicida. Os atributos do solo: pH, textura e os óxidos de ferro foram os que mais afetaram a persistência dos herbicidas. Conclui-se que a persistência do imazethapyr e do imazapic é muito longa em solos do estado Tocantins e que o uso desses herbicidas na região deve ser evitado devido ao alto risco da ocorrência de carryover ou ser bem planejada, quanto ao uso do solo em rotação de culturas susceptíveis.

Palavras-chave: carryover, imazapic, imazethapyr, only[®].

PERSISTENCE OF IMIDAZOLINONES IN SOILS UNDER CLEARFIELD SYSTEM OF RICE CULTIVATION

ABSTRACT

The commercial mixture of imazethapyr and imazapic herbicide has been used for the control of red rice and several other species of weeds found in rice crops, this system called Clearfield. However, their use may limit the succession of non-tolerant crops for long residual activity. The research objective with this work to determine the persistence of imazethapyr, imazapic and mixing in three of Tocantins state of soils. We conducted three experiments in completely randomized design with four replications, each corresponding to the evaluated soil (Haplic Plinthosol, Yellow Oxisol and Epiquic Haplustult). The treatments were arranged in a split plot design, with the allocated plots herbicides (imazethapyr and imazapic isolated and commercial mixture) and the plots allocated the 11 evaluation times (1, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 days after treatment (DAT)), and a control without application. Contacted up long residual effect of imazethapyr and commercial mixture of imazethapyr and imazapic, regardless of assessed soil. After 150 days of applying herbicides or commercial mixture, its residues in the soil also inhibited approximately 94% of the mass of dry matter accumulation of indicator plants. When applied imazapic in isolation there was a higher dry matter accumulation of indicator plants indicating less residual effect of this herbicide in the soil, and this was attributed to lower dose of this herbicide applied. The attributes of the soil pH, texture and iron oxides were the most affected the persistence of herbicides. We conclude that the persistence of imazethapyr and imazapic is too long in Tocantins state of soils and the use of these herbicides in the region should be avoided due to the high risk of the occurrence of carryover or be well planned, as land use in rotation susceptible crops.

Keywords: carryover, imazapic, imazethapyr, only[®].

INTRODUÇÃO

A introdução do sistema Clearfield[®] (CL) no Brasil foi apresentada como opção para solucionar o principal problema das lavouras de arroz irrigado: solucionar o controle químico do arroz-vermelho. Contudo, vários estudos têm mostrado que a

adoção desse sistema pode restringir a sucessão de algumas culturas após seu cultivo (GROSH et al., 2008; KRAEMER et al., 2009a; MARCHESAN et al., 2011). O sistema CL consiste na utilização de cultivares de arroz resistentes aos herbicidas do grupo das imidazolinonas, entre os quais a mistura comercial de imazethapyr e imazapic ($75+25 \text{ g i.a.L}^{-1}$), em aplicações em pré ou pós-emergência.

O imazethapyr e o imazapic são herbicidas que atuam na inibição da enzima acetolactato sintetase (ALS), sendo recomendados para o controle de plantas daninhas em pós-emergência na cultura da soja e em pré e pós-emergência nas culturas de amendoim e cana-de-açúcar, respectivamente (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). Ambas as moléculas são herbicidas de caráter ácido ($pK_A=3,9$) e alta solubilidade em água, com eficácia em baixas doses e longa persistência no solo (KRAEMER et al., 2009b).

O uso de herbicidas com longo efeito residual no solo exerce controle prolongado das plantas daninhas, mas pode causar intoxicação em culturas semeadas em sucessão. Ademais, eles apresentam riscos de contaminação aquática, seja por lixiviação ou por escoamento superficial (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). Entre os processos que determinam a persistência dos herbicidas no solo, destacam-se a sorção, a lixiviação, a degradação e, ou, a transformação biológica. Esses fatores regulam a concentração, o fluxo e o tempo de permanência dessas moléculas na solução do solo (OLIVEIRA JR.; REGITANO, 2009). Dessa maneira, fatores como a variabilidade das propriedades físicas e químicas do solo e a natureza do composto também influenciam diretamente a persistência dos agroquímicos no ambiente.

A persistência das imidazolinonas no solo é muito variável, sofrendo influência do pH (LOUX; REESE, 1993; AICHELE; PENNER, 2005), da umidade (BAUGHMAN; SHAW, 1996; AVILA et al., 2010) e do teor de matéria orgânica do solo (STOUGAARD et al., 1990; JOURDAN; AYENI, 1998). Quando as condições do solo favorecem a biodisponibilização dos herbicidas na solução deste, há possibilidade de ocorrer a degradação das moléculas. Normalmente, a degradação de um agrotóxico é causada pela ação de microrganismos (GOETZ et al., 1990; WANG et al., 2005) e pela decomposição fotolítica, especialmente quando expostos à luz ultravioleta (MALLIPUDI et al., 1991; ESPY et al., 2011). Nesse contexto, fatores que afetam a atividade microbiana e o acesso da luz aos herbicidas alteram a dinâmica de degradação desses produtos. Senseman (2007) relata que imazethapyr e imazapic sofrem limitada biodegradação sob condições anaeróbicas, o que pressupõe maior persistência em solos

hidromórficos, podendo ocorrer efeito residual sobre o arroz suscetível mesmo após 12 meses da aplicação (VILLA et al., 2006).

Os processos de distribuição e degradação de herbicidas no solo são dinâmicos e únicos para cada relação solo-herbicida. Considerando que a mistura comercial de imazethapyr e imazapic é muito utilizada em lavouras de arroz que adotam o sistema Clearfield®, além da carência de informações sobre o seu comportamento em solos tropicais, realizou-se este trabalho com o objetivo de estimar a persistência desses herbicidas, aplicados em mistura comercial e isolados, em três solos do Estado do Tocantins.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três experimentos em casa de vegetação, no campus da Universidade Federal do Tocantins-TO. Cada experimento correspondeu a um tipo de solo estudado: Plintossolo Háptico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háptico (GX), provenientes de Formoso do Araguaia, Gurupi e Lagoa da Confusão, Estado do Tocantins, respectivamente. Todas as amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, peneiradas em malhas de 4 mm e, posteriormente, caracterizadas química e fisicamente (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 - Resultados das análises química e físico-químicas das amostras dos solos: Plintossolo Háptico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háptico (GX)

Solo	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	(t)	V	m
		(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)					(%)	
FX	6,1	3,5	27	3,39	1,35	0,00	3,0	4,8	61,6	0,0
LVA	5,7	0,8	79	0,99	0,52	0,00	4,7	1,7	26,7	0,0
GX	5,2	1,3	82	1,69	0,75	0,57	5,2	3,2	33,8	17,7
		Fe Oxalato		Fe Ditionito			MO			
				(dag kg ⁻¹)						
FX		0,10		1,29			2,22			
LVA		0,14		2,19			3,00			
GX		0,56		0,83			2,35			

Análises realizadas segundo metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

Tabela 2 - Resultados das análises físicas e classificação textural das amostras dos solos: Plintossolo Háplico (FX), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Gleissolo Háplico (GX)

Solo	A. Grossa	A. Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	(dag kg ⁻¹)				
FX	17	30	16	37	Argilo Arenosa
LVA	32	23	6	39	Argilo Arenoso
GX	0	32	45	23	Franco

Os experimentos foram conduzidos no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcela subdividida, sendo nas parcelas avaliados os herbicidas (imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial) e, nas subparcelas, as 11 épocas de semeadura da espécie bioindicadora (1, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 e 150 dias após o tratamento - DAT), além de uma testemunha sem aplicação.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de plásticos com capacidade de 0,33 dm³, preenchidos com os solos. Após o preparo dos vasos, foram aplicados na sua superfície o imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial, nas doses de 75 e 25 g ha⁻¹, respectivamente. Utilizou-se um pulverizador pressurizado a CO₂ comprimido, equipado com barra com dois bicos TT11002, espaçados de 0,50 m, mantidos à pressão de 25 lb pol⁻², com volume de calda de 150 L ha⁻¹.

Nas épocas correspondentes, realizaram-se os ensaios biológicos, que consistiu da semeadura de cinco sementes de sorgo (*Sorghum vulgare*), cultivar BRS 655, por vaso, como planta indicadora da presença dos herbicidas. A umidade dos solos foi mantida por meio de irrigações diárias, mantendo-se o solo próximo à capacidade de campo. Para manter o bom crescimento das plantas indicadoras, estas foram irrigadas com solução nutritiva completa de Hoagland e Arnon (1950). Aos dez dias após a emergência (DAE) realizou-se o desbaste, permanecendo apenas três plantas em cada vaso.

Aos 21 DAE da espécie indicadora, foram realizadas as avaliações de intoxicação (escala visual variando de 0 a 100, em que 0 significa planta sem sintoma e 100 a morte da planta). Posteriormente, as plantas foram seccionadas rente ao solo e acondicionadas em sacos de papel. Estes foram levados para secagem, em estufa com circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) até atingir massa constante, sendo determinada posteriormente a matéria seca das plantas.

Para a interpretação dos resultados, os dados foram submetidos à análise de variância. Os fatores qualitativos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, e para os dados quantitativos foram geradas curvas por análises de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Constatou-se interação significativa entre os fatores época de semeadura e herbicidas, na matéria seca, em todos os experimentos (tipos de solo). Desse modo, realizou-se o desdobramento da interação, estudando-se os três herbicidas para cada época de semeadura da espécie bioindicadora e as 11 épocas de semeadura em cada herbicida.

Plintossolo Háplico (FX)

Observou-se baixo acúmulo de matéria seca (MS), em relação à testemunha, ao longo das épocas de semeadura após a aplicação da mistura dos herbicidas imazethapyr e imazapic e do imazethapyr isoladamente no Plintossolo Háplico (FX) (Tabela 3). Não houve diferença entre o imazethapyr e o imazapic isolados e em mistura até os 60 dias após aplicação (DAA). Isso demonstra que os herbicidas apresentaram efeito residual semelhante até os 60 DAA, mesmo quando aplicados em doses diferentes.

Aos 75 DAA e nas demais datas de avaliação, observou-se que a mistura comercial de imazethapyr e imazapic e o imazethapyr isolado continuaram reduzindo acentuadamente a MS das plantas bioindicadoras, ao passo que no imazapic notou-se recuperação delas. O aumento da MS no tratamento com imazapic foi gradativo com o avançar das épocas de avaliação.

Na Figura 1, é possível notar que a atividade residual da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e do imazethapyr isolado diminuiu ao longo das épocas de semeadura, com pequeno incremento de matéria seca da parte aérea das plantas de sorgo (Figura 1). Contudo, houve alto efeito residual, que pode ser constatado pelos altos níveis de intoxicação das plantas até 150 DAA (Tabela 4), indicando alta persistência da mistura formulada e do imazethapyr isolado no Plintossolo Háplico.

Tabela 3 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Plintossolo Háplico-FX

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
1	0,8 A	1,1 A	1,5 A
15	0,7 A	1,5 A	1,4 A
30	1,8 A	2,2 A	1,4 A
45	1,7 A	2,0 A	1,5 A
60	1,9 A	2,5 A	7,1 A
75	2,7 B	2,9 B	25,1 A
90	3,4 B	7,1 B	39,6 A
105	3,3 B	8,9 B	69,8 A
120	4,5 B	13,2 B	71,1 A
135	5,4 C	15,3 B	83,7 A
150	5,8 C	15,6 B	80,7 A
CV (%) da parcela	27,4		
CV (%) da subparcela	23,1		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

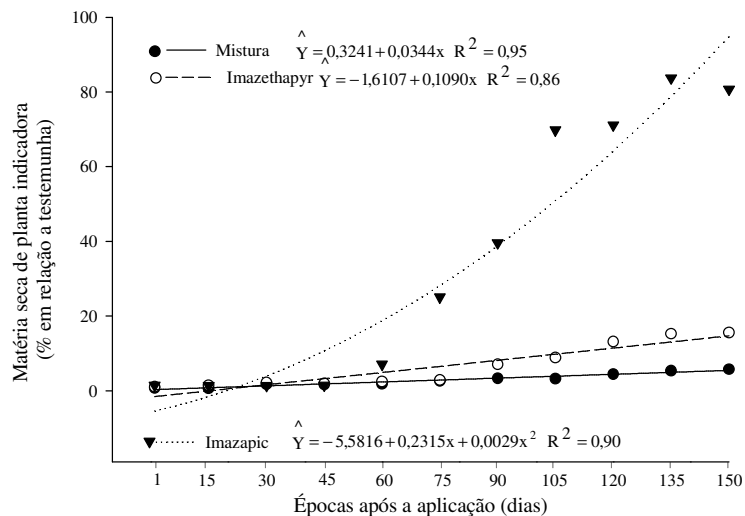


Figura 1 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Plintossolo Háplico-FX.

Tabela 4 - Intoxicação de plantas de sorgo avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Plintossolo Háplico-FX

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	Intoxicação (%)		
1	100,0	100,0	100,0
15	100,0	100,0	100,0
30	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0
60	100,0	100,0	91,2
75	98,7	98,7	80,0
90	96,0	94,7	62,2
105	93,2	88,2	53,5
120	88,2	85,0	33,2
135	87,0	83,2	26,7
150	84,7	82,2	23,2

A persistência de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas é variável com um conjunto de fatores, que incluem características físico-químicas das moléculas e do solo e as condições climáticas no período entre a sua utilização e a semeadura de plantas não tolerantes (KRAEMER et al., 2009b). Além disso, outros fatores, como o aumento da dose (SILVA et al., 1999), o pH reduzido (TRACY; PENNER, 2005) e o manejo adotado na área (PINTO et al., 2011), podem igualmente contribuir para o prolongamento da atividade residual de herbicidas do grupo das imidazolinonas.

A permanência de altos níveis de intoxicação visual nas diferentes épocas de avaliação do imazethapyr e do imazapic em mistura e do primeiro isolado demonstra que houve baixa degradação dos herbicidas no solo. A degradação das imidazolinonas é caracterizada por ser lenta e contínua (MANGELS, 1991). Além das características associadas à molécula, outro fator que pode ter contribuído na baixa degradação desses herbicidas no ambiente, é a sua forma de dissipação, é que sua dissipação é associada à degradação microbiana e decomposição fotolítica (WANG et al., 2006; ESPY et al., 2011).

Aichele e Penner (2005) afirmam que a dissipação de imazaquin, imazethapyr e imazamox diminuiu quando o pH do solo reduz de 7,0 para 5,0, devido ao aumento na sorção, com conseqüente redução da biodisponibilidade. Mesmo em condições de baixa

sorção do herbicida, pode haver baixa degradação do herbicida em função da baixa atividade microbiana. Wang et al. (2005) estudaram a degradação do imazapyr em condições de baixa atividade microbiana e constataram que a sua degradação é 4,4 vezes mais lenta em solos estéreis quando comparada à de solos em condições naturais.

Acredita-se que o Plintossolo Háptico apresenta características químicas que predisõem à menor sorção das imidazolinonas, como pH próximo à neutralidade e baixa atividade microbiana, as quais podem ter contribuído para o prolongamento da atividade residual dos herbicidas. O imazethapyr e o imazapic sofrem rápida fotólise em água, podendo ser uma forma importante de dissipação nesse meio. No entanto, nas condições do estudo (solo), as taxas de fotólise são mais lentas, em função da baixa penetração da luz no perfil do solo, sobretudo em solos com textura argilosa (BALMER et al., 2000; FRANK et al., 2002). Nesse sentido, em condições onde ocorre leve lixiviação dos herbicidas, a decomposição fotolítica fica restrita a uma porção muito reduzida.

Quanto ao herbicida imazapic, observou-se redução da atividade residual ao longo das épocas de avaliação, por meio da porcentagem de matéria seca em relação à testemunha (Figura 1) e das notas de intoxicação (Tabela 4). O aumento do acúmulo de MS em relação à testemunha nas plantas bioindicadoras, em solos tratados com o imazapic, demonstra que houve diminuição da concentração do herbicida na solução do solo. Esse fato, provavelmente, se deve à menor dose de aplicação em relação à mistura comercial e ao imazethapyr isolado, visto que as características físico-químicas dessas moléculas são semelhantes. Nesse contexto, Monquero et al. (2010) estudaram a persistência do imazapic com diferentes doses de aplicação em um Latossolo Vermelho distroférico (textura argilosa) e evidenciaram efeito residual satisfatório (>70%) até 60 DAA, havendo diferenças estatísticas entre as doses de aplicação de 190 e 210 g ha⁻¹.

Os resultados evidenciaram que a atividade residual da mistura comercial de imazethapyr e imazapic e a do primeiro isoladamente superam 150 dias após a aplicação em quantidade suficiente para causar redução no crescimento das plantas de sorgo, promovendo altos índices de intoxicação.

Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

Neste solo, constatou-se comportamento semelhante ao observado no Plintossolo Háplico; até os 75 dias após aplicação (DAA), os herbicidas causaram severa redução da matéria seca (MS) das plantas de sorgo, em relação à testemunha (Tabela 5). A partir dos 90 DAA, houve diferença significativa entre o acúmulo de MS das plantas: o imazapic isolado apresentou maiores valores de MS, indicando que houve redução da quantidade de herbicida livre na solução do solo ou sua degradação. No entanto, observou-se que a mistura comercial e o imazethapyr isolado apresentaram resíduo no solo até os 150 DAA, suficiente para reduzir o acúmulo de MS em 95,8 e 84,2%, respectivamente (Tabela 5), das plantas de sorgo.

Tabela 5 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
1	0,8 A	1,3 A	1,3 A
15	0,9 A	1,8 A	1,5 A
30	1,5 A	2,3 A	1,6 A
45	1,8 A	2,9 A	2,0 A
60	2,0 A	3,5 A	2,4 A
75	3,0 A	3,4 A	2,5 A
90	3,2 B	3,6 B	13,1 A
105	3,4 B	3,8 B	19,9 A
120	3,5 C	14,2 B	35,8 A
135	3,9 C	13,5 B	54,1 A
150	4,2 C	15,8 B	56,0 A
CV (%) da parcela	21,1		
CV (%) da subparcela	23,3		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A persistência da mistura comercial de imazethapyr e imazapic no solo por um período superior a 150 DAA já foi relatada em outros estudos (KRAEMER et al., 2009a; PINTO et al., 2011). Segundo Renner et al. (1998), herbicidas do grupo das

imidazolinonas podem apresentar residual no solo por até dois anos e, dependendo da cultura sucessora, causar fitotoxicidade (BALL et al., 2003). Prejuízos associados ao residual de imazethapyr e imazapic, isolados ou em mistura, foram relatados em diferentes culturas: alfafa, algodão, arroz, aveia, azevém, batata, canola, cebola, girassol, melão, milho, pimentão, rabanete, repolho, sorgo, trigo e tomate (BOVEY; SENSEMAN, 1998; ALISTER; KOGAN, 2005; SOUZA et al., 2012).

Em plantio de arroz não resistente às imidazolinonas, Villa et al. (2006) observaram redução no estande de plantas por efeito residual proveniente de aplicação da mistura de imazethapyr e imazapic em safras anteriores, porém sem efeito sobre a produtividade. Nesse sentido, Pinto et al. (2011) também constataram danos ao arroz não resistente quando semeado em rotação com arroz resistente às imidazolinonas. Estes autores relatam que, além da redução do estande, a produtividade, a estatura e a matéria seca da raiz do cultivar IRGA 417 também sofreram reduções significativas em áreas com resíduos desses herbicidas. Willians et al. (2002) sugerem intervalo de no mínimo 18 meses entre a aplicação do imazethapyr e a semeadura de arroz convencional, evitando risco de ocorrência de intoxicação.

Ao avaliar a atividade residual de cada herbicida nas diferentes épocas de semeadura das espécies bioindicadoras, verificou-se que a aplicação da mistura de imazethapyr e imazapic e do primeiro isolado diretamente no solo foi eficiente no controle das plantas de sorgo até 150 DAA, com produção de matéria seca inferior a 5% com a mistura e 17% com o imazethapyr (Figura 2), além de alta intoxicação das plantas de sorgo (Tabela 6) ao longo desse período.

A alta persistência dos herbicidas verificada neste estudo discorda dos resultados obtidos por Silva et al. (1999), que, ao realizarem estudo com culturas não tolerantes a herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, não constataram efeitos negativos sobre as culturas de milho e sorgo. As culturas foram semeadas 150 dias após a aplicação do imazethapyr, no dobro da dose recomendada em condições de campo. Contudo, esses autores atribuíram esses resultados à manutenção de temperaturas elevadas e de alta umidade no solo, oriunda da chuva ou de irrigações. Isso pode ter favorecido a degradação mais rápida dos herbicidas no solo, pela manutenção da atividade microbiana. Outra explicação para a ausência de efeito residual verificada a partir de 150 DAA no experimento de campo realizado por esses autores está relacionada à baixa sorção das imidazolinonas. Em campo, esses herbicidas podem lixiviar para camadas mais profundas, fazendo com que menores quantidades dos

herbicidas estejam presentes na camada de solo coletada, reduzindo o efeito sobre a biomassa das plantas de sorgo e milho.

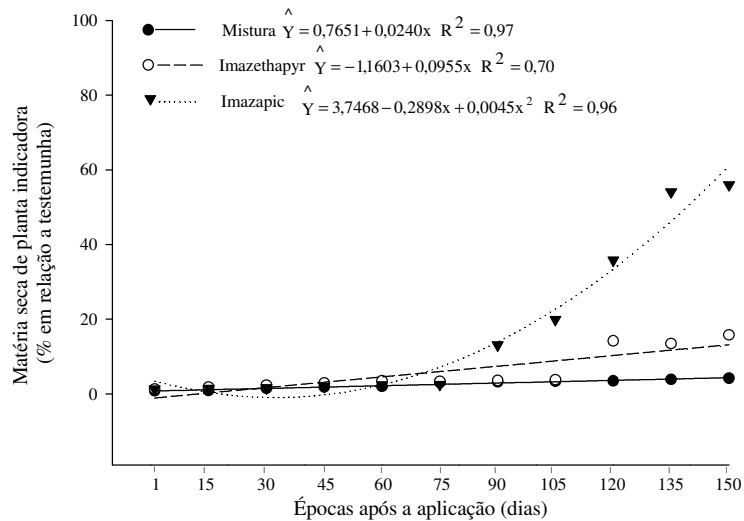


Figura 2 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes dias após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA.

Tabela 6 - Intoxicação de plantas de sorgo avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Latossolo Vermelho-Amarelo-LVA

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	Intoxicação (%)		
1	100,0	100,0	100,0
15	100,0	100,0	100,0
30	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0
60	100,0	98,7	97,5
75	99,0	97,7	95,5
90	97,2	96,2	86,2
105	96,2	95,0	84,5
120	96,0	85,7	69,7
135	95,5	85,0	60,5
150	90,0	83,0	57,0

Martini et al. (2011) avaliaram o efeito do manejo de irrigação do arroz sobre a lixiviação do herbicida composto pela mistura comercial de imazethapyr e imazapic. Esses autores verificaram maior concentração na camada de 5-20 cm de profundidade, indicando ser passível de movimentação ao longo do perfil do solo, e que, independentemente de como a irrigação é manejada, ela promove movimento vertical do herbicida.

Nas avaliações de persistência do imazapic isolado, observou-se incremento na produção de MS nas plantas de sorgo com o decorrer do tempo de aplicação, apresentando, aos 150 DAA, cerca de 44% de redução (Figura 2). As notas de intoxicação evidenciaram diminuição na concentração do imazapic no LVA ao longo dos períodos de avaliação (Tabela 6). Diferentemente dos resultados encontrados para a mistura comercial e o imazethapyr, nesse tratamento houve menor efeito residual e ação herbicida, possivelmente, pela menor concentração de resíduos disponíveis na solução do LVA.

As características físico-químicas do solo e de cada herbicida, associadas ao efeito de dose de aplicação, influenciam na persistência do imazethapyr e imazapic no solo. Elevado efeito residual de imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura, foi observado no Latossolo Vermelho-Amarelo, onde a mistura apresentou maior efeito residual aos 150 DAA.

Gleissolo Háplico (GX)

Neste solo, os resíduos da aplicação do imazethapyr e imazapic, isolados e em mistura comercial, reduziram em mais de 60% o acúmulo de matéria seca das plantas, em relação à testemunha, ao longo das épocas de semeadura da espécie bioindicadora (Tabela 7). Isso indica que ambos os herbicidas são persistentes no Gleissolo Háplico (GX). Aos 45 dias após a aplicação (DAA), foram encontradas altas concentrações dos herbicidas no solo, verificadas por meio do reduzido acúmulo de MS das plantas de sorgo. A partir dos 60 DAA, houve aumento significativo do acúmulo de MS nas aplicações de imazapic isolado. Por outro lado, a mistura de imazethapyr e imazapic e o imazethapyr isoladamente mantiveram alta concentração dos herbicidas livres no solo, com elevada redução da MS da planta bioindicadora até os 150 DAA.

A atividade residual da mistura comercial de imazethapyr e imazapic também foi observada por Sousa et al. (2012), que encontraram, aos 1.100 dias após sua aplicação,

reduções da MS da parte aérea das plantas de milho, pepino, rabanete e tomate semeadas em solos contendo resíduos dessa mistura. Em relação ao imazethapyr, Dan et al. (2011) observaram atividade residual do herbicida sobre o milho cultivado em sucessão à soja.

Tabela 7 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Gleissolo Háplico-GX

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	% de matéria seca em relação à testemunha		
1	1,1 A	1,0 A	1,2 A
15	1,3 A	1,2 A	1,3 A
30	1,3 A	1,5 A	1,9 A
45	1,5 A	1,7 A	2,0 A
60	1,9 B	1,8 B	4,5 A
75	2,2 B	2,9 B	9,3 A
90	2,4 B	3,1 B	11,3 A
105	2,5 B	3,2 B	15,7 A
120	2,5 C	3,9 B	21,9A
135	2,7 C	4,8 B	28,0 A
150	3,0 C	6,3 B	34,2 A
CV (%) da parcela	15,5		
CV (%) da subparcela	11,3		

Médias seguidas pelas mesmas letras, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em geral, sabe-se que fatores associados à sorção dos herbicidas do grupo das imidazolinonas afetam a persistência dessas moléculas no solo. A princípio, a degradação de uma molécula ocorre quando esta se encontra na solução do sol, e o aumento da sorção dos herbicidas aos coloides reduz sua concentração. Esse fato poderia diminuir a possibilidade de degradação da molécula via decomposição microbiana e, ou, fotolítica.

As imidazolinonas apresentam natureza química anfótera, com dois grupos funcionais ionizáveis: um grupo carboxílico (ácido) e um amino (básico), sendo que o imazethapyr possuía capacidade de dissociação eletrolítica (pKA) de 3,9 no carboxílico e 2,1 no amino (SENSEMAN, 2007). No valor de pH do Gleissolo Háplico (Tabela 1), o imazethapyr e o imazapic encontram-se predominantemente na forma aniônica, o que

favorece a biodisponibilidade desses herbicidas, em função da repulsão entre as moléculas e os sítios de carga negativa do solo. Nessas condições, é esperado aumento da degradação dos herbicidas, em razão da menor sorção na matriz do solo. Todavia, os valores de acúmulo de matéria seca (Tabela 7) demonstram reduzida degradação das imidazolinonas no Gleissolo Háplico, sendo esta lenta, porém ininterrupta, visto que, com o decorrer das épocas de semeadura, houve aumento da MS das plantas de sorgo (Figura 3).

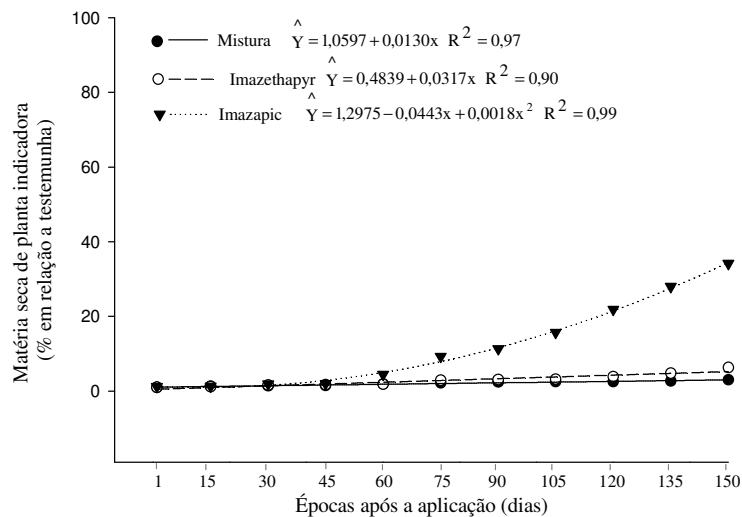


Figura 3 - Porcentagem de matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo, em relação à testemunha, avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes dias após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Gleissolo Háplico-GX.

Apesar do predomínio de cargas negativas nas moléculas das imidazolinonas em pH, maiores que seu pKa, o imazethapyr e o imazapic, em solos intemperizados, podem interagir com as porções positivas da matéria orgânica, com os cátions metálico e com os óxidos de ferro, como forma de se manterem sorvidos, não retornando com facilidade à solução do solo, o que aumentaria a sua persistência. Assim, prolongaria a sua atividade residual, conforme observado neste estudo. Firmino et al. (2008) encontraram alta correlação positiva entre a sorção do imazapyr e os teores de MO (0,99), argila (0,97), ferro oxálico (0,82) e ferro ditionito (0,76) em três solos de Minas Gerais. Esses autores relataram que o solo argiloso apresentou maior razão de sorção, quando comparado ao solo franco-argiloarenoso e a uma areia franca. Para os autores, a maior adsorção verificada no solo argiloso é atribuída à concentração de Fe oxálico e de Fe ditionito. Nessa circunstância, essas características podem também ter contribuído para

a persistência dos herbicidas do grupo da imidazolinonas no Gleissolo Háplico, tendo em vista as suas concentrações relevantes de Fe oxálico e de Fe ditionito (Tabela 1).

Ao avaliar a persistência de cada herbicida ao longo das épocas de aplicação, constatou-se que os resíduos do imazethapyr e imazapic em mistura e do imazethapyr isolado sofreram reduzida degradação no solo. Ambos os herbicidas promoveram baixo acúmulo de MS (Figura 3) e elevado índice de intoxicação visual das plantas de sorgo (Tabela 8) até os 150 DAA. Apesar de haver diminuição da concentração da molécula de imazapic livre no solo aos 150 DAA, essa quantidade residual do herbicida foi suficiente para reduzir a MS das plantas de sorgo em 66% e provocar intoxicação visual de 65% (Figura 3 e Tabela 8).

Tabela 8 - Intoxicação de plantas de sorgo avaliadas aos 21 dias após a emergência das plântulas, semeadas em diferentes épocas após a aplicação do imazethapyr e imazapic de forma isolada e em mistura comercial, em um Gleissolo Háplico-GX

Épocas de semeadura (cm)	Herbicida		
	Imazethapyr + Imazapic (75 + 25 g ha ⁻¹)	Imazethapyr (75 g ha ⁻¹)	Imazapic (25 g ha ⁻¹)
	Intoxicação (%)		
1	100,0	100,0	100,0
15	100,0	100,0	100,0
30	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0
60	100,0	100,0	100,0
75	100,0	100,0	97,0
90	100,0	100,0	95,0
105	100,0	100,0	90,0
120	100,0	100,0	85,0
135	100,0	100,0	80,0
150	100,0	95,0	65,0

A menor atividade residual do imazapic isolado no solo, quando comparado aos demais herbicidas, pode ser consequência do efeito de menor dose do produto, onde a dose aplicada do imazapic é um quarto da dose do imazethapyr + imazapic. Inoue et al. (2000), ao avaliarem a persistência do imazethapyr e do imazaquim em condições de campo, observaram efeito consistente da dose sobre a meia-vida dos herbicidas. Resultados encontrados por Dan et al. (2012) confirmam o efeito de dose na persistência do imazethapyr; a aplicação de 60 g ha⁻¹ não foi suficiente para promover efeitos

negativos sobre o acúmulo de MS de milho cultivado em sucessão com a soja. Contudo, a dose de 100 g ha⁻¹ promoveu efeito residual significativo no milho.

Neste trabalho, comprovou-se que os herbicidas imazethapyr e imazapic apresentam longa persistência no Gleissolo Háplico, podendo permanecer em concentração suficiente para interferir negativamente no acúmulo de matéria seca das plantas de culturas sensíveis, cultivadas em sucessão à cultura principal, em intervalo de tempo superior a 150 dias após sua aplicação. Além disso, os resultados obtidos nos experimentos com diferentes solos (Plintossolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico) evidenciam que o período residual do imazethapyr e imazapic em mistura comercial é maior do que quando estes herbicidas são aplicados de forma isolada. Constatou-se, ainda, que a persistência dos referidos herbicidas é dependente das características físicas e químicas de cada solo. Em solos com menores valores de pH, o imazethapyr e imazapic apresentaram maior persistência. O menor período residual no solo do imazapic em aplicação isolada pode ser atribuído à menor dose desse herbicida. Conclui-se que aplicações dos herbicidas imazethapyr e imazapic, de forma isolada ou em mistura, nos solos avaliados resultaram em longo efeito residual. Assim, novas pesquisas são necessárias para definir o período residual dos herbicidas nesses solos, visando à sucessão de culturas nas áreas tratadas com esses herbicidas. Além disso, por apresentarem baixa sorção nos solos estudados, aliada à longa persistência nas condições avaliadas, aplicações desses herbicidas representam alto risco de contaminação ambiental do solo e de águas superficiais e subterrâneas, além da ocorrência de *carryover*.

LITERATURA CITADA

AICHELE, T. M.; PENNER, D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil. **Weed Technology**, v. 19, n. 1, p. 154-159, 2005.

ALISTER, C.; KOGAN, M. Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. **Crop Protection**, v. 24, n. 4, p. 375-379, 2005.

AVILA, L. A.; MARCHEZAN, M.; FRANÇOIS, T.; CEZIMBRA, D. M.; SOUTO, K. M.; REFATTI, J. P. Toxicidade da mistura formulada de imazethapyr e imazapic sobre o azevém em função do teor de umidade do solo. **Planta Daninha**, v. 28, p. 1041-1046, 2010. (Número Especial)

BALL, D. A.; YENISH, J. P.; ALBY, T. Effect of imazamox soil persistence on dryland rotational crops. **Weed Technology**, v. 17, n. 1, p. 161-165, 2003.

BALMER, M. E.; GOSS, K. U.; SCHARZENBACH, R. P. Photolytic transformation of organic pollutants on soil surfaces-an experimental approach. **Environmental Science Technology**, v. 34, n. 7, p. 1240-1245, 2000.

BAUGHMAN, T. A.; SHAW, D. R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailable imazaquin. **Weed Science**, v. 44, n. 2, p. 380-382, 1996.

BOVEY, R. W.; SENSEMAN, S.A. Response of food and forage crops to soil-applied imazapyr. **Weed Science**, v. 46, n. 5, p. 614-617, 1998.

DAN, H. A.; BARROSO, A. L. L.; DAN, L. G. M.; PROCÓPIO, S. O.; OLIVEIRA JR., R. S.; SIMON, G. A.; MUNHOZ, D. M. Atividade residual de herbicidas aplicados em pós-emergência na cultura da soja sobre o milheto cultivado em sucessão. **Planta Daninha**, v. 29, n. 3, p. 663-671, 2011.

DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; OLIVEIRA NETO, A. M.; GUERRA, N. Resíduos de herbicidas utilizados na cultura da soja sobre o milho cultivado em sucessão. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 86-91, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ESPY, R.; PELTON, E.; OPSETH, A.; KASPRISIN, J.; NIENOW, A.N. Photodegradation of the Herbicide Imazethapyr in Aqueous Solution: Effects of Wavelength, pH, and Natural Organic Matter (NOM) and Analysis of Photoproducts. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 7277-7285, 2011.

FIRMINO, L. E.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, L. R.; FERREIRA, F. A.; QUIRINO, A. L. S. Movimento do herbicida imazapyr no perfil de solos tropicais. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 223-230, 2008.

FRANK, M. P.; GRAEBING, P.; CHIB, J. S. Effect of soil moisture and sample depth on pesticide photolysis. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 9, p. 2607-2614, 2002.

GOETZ, A. J.; LAVY, T. L.; GBUR JR., E. E. Degradation and field persistence of imazethapyr. **Weed Science**, v. 38, n. 4/5, p. 421-428, 1990.

GROSH, M.; SANTOS, F. M.; MARCHEZAN, E; MASSONI, P. F. S.; AROSEMENA, D. R.; AVILA, L. A. Residual da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sobre azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) cultivado em sucessão ao arroz tolerante. **Ciência Rural**, v. 38, n. 6, p. 1754-1757, 2008.

HOAGLAND, D.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. California Agriculture Experimental Station Circular, 1950. 347 p.

INOUE, M. H.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA, M. F. Persistência da atividade biológica de imazaquin e imazethapyr aplicados em duas épocas do ano. **Acta Scientiarum**, v. 22, n. 4, p. 993-997, 2000.

- JOURDAN, S. W.; AYENI, A. O. Imazethapyr bioactivity and movement in soil. **Weed Science**, v. 46, n. 5, p. 608-613, 1998.
- KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M.; MASSONI, P. F. S.; SARTORI, G. M. S. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009a.
- KRAEMER, A. F.; MARCHESAN, E.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; GROHS, M. Destino ambiental dos herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 629-639, 2009b.
- LOUX, M.; REESE, K. Effect of soil type and pH on persistence and carryover of imidazolinones herbicides. **Weed Technology**, v. 7, n. 2, p. 452-458, 1993.
- MALLIPUDI, N. M.; STOUT, S. J.; CUNHA, A. R.; LEE, A. Photolysis of imazapyr (AC243997) herbicide in aqueous media. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 2, p. 412-417, 1991.
- MANGELS, G. Imazethapyr herbicides. In: SHANER, D.; CONNOR, S. (Eds.). **The imidazolinones herbicides**. Boca Raton: CRC Press, 1991. p. 191-209.
- MARTINI L. F. D.; AVILA, L. A.; SOUTO, K. M.; CASSOL, G. V.; REFATTI, J. P.; MARCHESAN, E.; BARROS, C. A. P. Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de irrigação do arroz. **Planta Daninha**, v. 29, p. 185-193, 2011.
- MARCHESAN, E.; MASSONI, P. F. S.; VILLA, S. C. C.; GROHS, M.; AVILA, L. A.; SARTORI, G. M. S.; BRUCK, R. F. Produtividade, fitotoxicidade e controle de arroz-vermelho na sucessão de cultivo de arroz irrigado no Sistema CLEARFIELD®. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, p. 17-24, 2011.
- MONQUERO, P. A.; SILVA, P. V.; SILVA HIRATA, A. C.; TABLAS, D. C.; ORZARI, I. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010.
- OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A.M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA Jr., R. S.; CONSTANTINI, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de planta daninha**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011. p. 264-304.
- OLIVEIRA JR., R. S.; REGITANO, J. B. Dinâmica de pesticidas no solo. In: MELO V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: parte II, aplicações**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 187-248.
- PINTO, J. J. O.; NOLDIN, J. A.; SOUSA, C. P.; AGOSTINETTO, D.; PIVETA, L.; DONIDA, A. Atividade residual de imazethapyr + imazapic em arroz semeado em rotação com o arroz Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 205-216, 2011.
- RENNER, K. A.; SCHABENBERGER, O.; KELLS, J. J. Effect of tillage an application method on corn (*Zea mays*) response to imidazolinone residues in soil. **Weed Technology**, v. 12, n. 2, p. 281-285, 1998.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina, PR, 2011. 697 p.

SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.

SILVA, A. A.; OLIVEIRA JR., R. S.; COSTA, E. R.; FERREIRA, L. R.; CONSTANTIN, J.; APOLONI, D. K. M.; OLIVEIRA, M. F. Persistência de herbicidas do grupo das imidazolinonas e efeitos sobre as culturas sucessoras de milho e sorgo. **Acta Scientiarum**, v. 21, n. 3, p. 459-465, 1999.

SOUSA, C. P.; BACARIN, M. A.; PINTO, J. O. Crescimento de espécies bioindicadoras do residual do herbicida (imazethapyr+imazapic), semeadas em rotação com arroz clearfield®. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 105-111, 2012.

STOUGAARD, R. N.; SHEA, P. J.; MARTIN, A. R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility and efficacy of imazaquin and imazethapyr. **Weed Science**, v. 36, n. 1, p. 67-73, 1990.

TRACY, M. A.; PENNER, D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil. **Weed Technology**, v. 19, n. 1, p. 154-159. 2005.

VILLA, S.C.C.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A.; MASSONI, P. F. S.; TELO, G. M.; MACHADO, S.L.O.; CAMARGO, E. R. Arroz tolerante a imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.

WANG, X.; WANG, H.; FAN, D. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions. **International Journal Environmental Analytical Chemistry**, v. 86, n. 8, p. 541-551, 2006.

WANG, X.; ZHOU, S. M.; FAN, D. Biodegradation of imazapyr in typical soils in Zhejiang Province, China. **Journal Environmental Science**, v. 17, n. 4, p. 593-597, 2005.

WILLIAMS, B. J.; STRAHAN, R.; WEBSTER, E. P. Weed management systems for Clearfield Rice. **Louisiana Agricultural**, v. 45, n. 3, p. 16-17, 2002.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento prévio das interações dos herbicidas com os colóides do solo é condição necessária para se prever o comportamento desses compostos quando aplicados nas diferentes classes de solo. Esse conhecimento permitirá a seleção de dosagens adequadas nos diferentes solos, bem como evitar efeitos prejudiciais ao ambiente e às culturas subsequentes. Nesta pesquisa, comprovou-se que a sorção, a lixiviação e a persistência do imazethapyr e do imazapic, isolados e em mistura, são influenciadas pelas características físicas e químicas dos solos. Maiores teores de óxidos de ferro e menores valores de pH dos solos favorecem a sorção e a persistência do imazethapyr e do imazapic.

Nos solos com maiores valores de pH e textura arenosa houve maior lixiviação. Além disso, a dissipação do imazethapyr e imazapic foi lenta, resultando em um período residual superior a 150 DAA nos solos que mostraram menores valores de pH.

Considerando os resultados observados neste trabalho, conclui-se que os cuidados ao recomendar esses herbicidas derivados das imidazolinonas nos solos avaliados devem ser redobrados. O risco de contaminação dos solos avaliados e das águas por esses compostos é muito elevado. Além disso, novas pesquisas necessitam ser realizadas para definir o período residual dos herbicidas nos solos do Estado de Tocantins, visando à sucessão de culturas nas áreas tratadas. Isso é necessário porque, neste trabalho, os tratamentos avaliados não permitiram a determinação do período residual total desses herbicidas nos solos avaliados.