

Revista Agrária Acadêmica

Agrarian Academic Journal

Volume 2 – Número 2 – Mar/Abr (2019)

doi: 10.32406/v2n22019/105-117/agrariacad

Degradação de moléculas herbicidas no solo sob diferentes temperaturas. Degradation of the herbicides molecules in soil under different temperatures

Viviane Wruck Trovato^{1*}, Rômulo Penna Scorza Júnior²

^{1*} - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais/Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS - CEP 79804-970 – Dourados/MS - Brasil, E-mail: viviane.wruck.trovato@gmail.com

² - Embrapa Agropecuária Oeste e Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais/Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS - Dourados/MS – Brasil.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes temperaturas sobre a degradação das moléculas dos herbicidas ametrina, hexazinona e diurom em um Latossolo Vermelho Distroférico típico incubado a 25, 35, 40 e 45 °C, com umidade de 70% da capacidade de campo. Os herbicidas diurom e hexazinona se mostraram mais persistentes em condições de temperatura mais amena (25°C). Já a ametrina, demonstrou maior persistência no solo em condições de temperatura mais elevada (45°C). Os valores de meia-vida para os três herbicidas avaliados nas diferentes temperaturas variaram de 24 a 77 dias para a ametrina, de 30 a 77 dias para a hexazinona e de 32 a 99 dias para o diurom.

Palavras-chave: ametrina, hexazinona, diurom, persistência no solo

Abstract

The objective of this work was to evaluate the effect of different temperatures on the degradation of ametryn, hexazinone and diuron molecules in a typical Dystroferic Red Latosol incubated at 25, 35, 40 and 45°C, with soil moisture of 70% of field capacity. Diuron and hexazinone herbicides were more persistent under warmer temperature conditions (25°C). On the other hand, ametryn showed higher persistence in the soil at higher temperature (45°C) conditions. The half-life values for the three herbicides at different temperatures ranged from 24 to 77 days for ametryn, 30 to 77 days for hexazinone and 32 to 99 days for diuron.

Keywords: ametryn, hexazinone, diuron, persistence in soil

Introdução

Diversos processos podem influenciar o comportamento ambiental dos defensivos agrícolas nos diferentes compartimentos ambientais (por exemplo, solo e água), como a sorção, lixiviação, volatilização, fotodegradação, degradação química, microbiológica, escoamento superficial e a absorção pelas plantas (AL-MAMUN, 2017). Entre estes processos, a degradação é de fundamental importância na redução dos níveis de resíduos dos defensivos agrícolas nos solos, que além dos impactos ao meio ambiente, podem causar danos à saúde humana (LOPES et al., 2018; KIM et al., 2017). Na degradação, a estrutura destes compostos é transformada com a quebra das suas moléculas, de forma biótica ou abiótica, tornando-as, na maioria dos casos, menos tóxicas que as moléculas originais (FENNER et al., 2013).

Os três principais tipos de degradação de defensivos agrícolas são a fotodegradação, a degradação química e a microbiológica (GAVRILESCU, 2005). A fotodegradação ocorre com a presença da luz, onde pode provocar a quebra dos compostos em moléculas menores de menor toxicidade, sendo a principal reação à oxidação (BURROWS et al., 2002). A degradação química consiste na quebra de moléculas nas quais organismos não estejam envolvidos, como, por exemplo, a hidrólise e a oxi-redução (ZENG et al., 2012). A degradação microbiológica é realizada pelos microrganismos do solo, por dois principais processos: i) o metabolismo, em que o agrotóxico serve como fonte de energia e ii) o co-metabolismo, onde os microrganismos se desenvolvem em função de outro substrato, produzindo enzimas que podem modificar a molécula dos agrotóxicos (SINGH, 2017).

De maneira geral, índices de degradação dos agrotóxicos podem variar no solo, conforme o sistema de manejo agrícola, adaptação microbiológica no ambiente, variação de umidade e temperatura, propriedades físicas e químicas, bem como as propriedades do agrotóxico (SCORZA JÚNIOR; FRANCO, 2013; PORTILHO et al., 2015; AL-MAMUN, 2017). O uso intensivo destes produtos pode caracterizar uma importante fonte de contaminação ambiental do solo (CALDERON et al., 2016) e dos recursos hídricos (PORTUGAL et al., 2017). A persistência de um herbicida no solo é caracterizada pela meia-vida, que é definida como o tempo necessário para que ocorra a degradação de 50% da quantidade inicial do herbicida aplicado (SOUZA, 2016). Estudos em solos brasileiros têm mostrado que a meia-vida da ametrina variou de 28 a 49 dias (SILVA, 2016), a da hexazinona de 83 a 182 dias (SOUZA, 2016) e do diuron de 40 a 91 dias (ROCHA et al., 2013). Estes compostos são importantes no controle de plantas daninhas, com destaque nas lavouras da cultura de cana-de-açúcar (LORENZI, 2014; LEWIS et al., 2016). Por outro lado, estudos específicos envolvendo a cinética de degradação destes herbicidas em relação à temperatura no ambiente solo são limitados. Informações sobre meia-vida desses compostos em relação à temperatura são importantes dados de entrada de simuladores utilizados na Avaliação de Risco Ambiental (ARA) de agrotóxicos, mais especificamente na etapa de caracterização da exposição aonde se faz uso de simuladores para gerar estimativas de concentrações ambientais. Autoridades regulatórias no Brasil iniciaram recentemente o uso da ARA de agrotóxicos no processo regulatório, sendo assim de grande importância a geração de dados como, por exemplo, de cinética de degradação de herbicidas, em condições de solo brasileiros.

Diante do exposto e devido à falta de informações sobre a cinética de degradação dos herbicidas ametrina, hexazinona e diuron em solos usualmente cultivados com cana-de-açúcar no estado de Mato Grosso do Sul, objetivou-se neste trabalho avaliar a influência da temperatura na degradação desses herbicidas em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, na região de Dourados, MS.

Material e Métodos

Amostras compostas de um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf) de textura argilosa (SANTOS et al., 2006) foram coletadas nos dias 10/04/2017 e 05/07/2017 no campo experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, Mato Grosso do Sul (22°16'26,6"S 54°48'50,6"W). Para as amostras compostas, subamostras foram coletadas de forma aleatória na profundidade de 0-20 cm, com o auxílio de um trado holandês. Após a coleta, as subamostras foram secas ao ar em casa de vegetação, destorroadas manualmente e peneiradas em malha de 2 mm. Os principais atributos do solo são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do Latossolo Vermelho Distroférico típico da área experimental em Dourados, MS.

Prof. (cm)	CO (g kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)
0-30	19,4	5,8	5,1	134	127	739
50-70	17,2	5,9	5,3	117	111	772

Para determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico em laboratório, pesou-se 100g de solo úmido que foi transferido para recipientes de alumínio. Em seguida, os recipientes foram pesados e levados para estufa de secagem com temperatura de 105°C durante 24 horas. Após esse período, quantificou-se a água perdida pesando-se novamente os recipientes para avaliara quantidade de água perdida. Essa determinação foi realizada em triplicata. A capacidade de campo utilizada foi de 70%.

As soluções estoques dos herbicidas ametrina, hexazinona e diurom, na concentração de 1 mg mL⁻¹, foram preparadas dissolvendo-se 10 mg de cada padrão, separadamente, em 10 mL de acetona grau HPLC e armazenadas individualmente em freezer a -20°C. Os padrões analíticos de ametrina, hexazinona e diurom apresentaram valores de pureza de 98,5%, 99,9 e 99,6%, respectivamente. A partir da solução estoque foram feitas novas soluções em metanol grau HPLC (High performance liquid chromatography) para construção da curva analítica nas concentrações de 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10 ng µL⁻¹, para cada herbicida. Essas concentrações foram utilizadas para a construção da curva analítica. A partir das soluções estoques também foram obtidas as soluções de trabalho, na concentração de 10 ng µL⁻¹ em metanol grau HPLC, que foi posteriormente utilizada para as fortificações das amostras de solo no experimento de degradação.

Para incubação das amostras de solo pesou-se 50g de solo seco que foram acondicionados em béqueres de 100 mL. Essas amostras de solo foram, anteriormente à pesagem, pré-incubadas por um período de sete dias para recuperação da atividade microbiana. A fortificação das amostras de solo foi realizada no dia 04/05/17 para as temperaturas de 35, 40 e 45 °C e no dia 11/07/17 para a temperatura de 25 °C, utilizando-se dos produtos comerciais dos herbicidas ametrina, cuja marca comercial é Gesapax 500® 500g i.a. L⁻¹, hexazinona (Magnus BR® 800 g i.a. kg⁻¹) e diurom (Belo BR® 500 g i.a. L⁻¹). Na fortificação foram adicionadas ao solo, separadamente, 8,3 µg de ametrina e diurom e 7 µg de hexazinona, em cada béquer. Essas quantidades correspondem à quantidade necessária para quantificação dos herbicidas dentro do limite de quantificação ao fim dos 55 dias de incubação.

Em seguida, as amostras de solo em cada béquer foram individualmente homogeneizadas com colheres descartáveis. A umidade em cada amostra de solo foi ajustada a 70% da CC utilizando-se água ultrapura (condutividade de 0,5 µS cm⁻¹ e resistividade de 18 mΩ). Os béqueres foram

devidamente tampados com papel alumínio com furos na parte superior para manutenção das trocas gasosas e assim da condição aeróbica do meio. As amostras foram acomodadas em incubadoras do tipo BOD na ausência de luz e em condições controladas de temperatura de 25, 35, 40 e 45°C. A umidade do solo foi mantida constante, repondo-se diariamente as perdas de umidade com água ultrapura. O experimento foi conduzido por 55 dias, sendo as amostras retiradas em duplicatas das incubadoras nos tempos de 0, 3, 6, 9, 15, 27, 40, 55 dias após a fortificação.

Para extração dos herbicidas do solo, cada amostra no béquer (50 g) foi totalmente transferida para um erlenmeyer de 250 mL com tampa. Em seguida, adicionou-se 100 mL de metanol grau HPLC, deixando-as em mesa agitadora a 216 rpm por uma hora. Após essa etapa, as amostras foram colocadas em repouso por duas horas e, em seguida, parte da fração líquida (50 mL) foi retirada com pipeta de vidro e transferida para balões volumétricos que foram levados a rotaevaporador até que o mesmo ficasse totalmente seco, sendo seu extrato retomado com 4 mL de metanol grau HPLC e filtrado em filtro de seringa de celulose regenerada de 0,45 µm, para armazenamento em vials a -20°C até o momento da quantificação.

Para identificação e quantificação dos três herbicidas utilizou-se cromatógrafo líquido de alta eficiência (CLAE), com detector de arranjo de diodos (DAD), modelo Varian 920-LC e equipado com coluna de fase reversa C-18 Pursuit XRs (25 cm x 4,6 mm x 5 µm) e pré-coluna C-18 Pursuit XRs (2,5 cm x 4,6 mm x 5 µm). Para eluição utilizou-se fase móvel em sistema de gradiente com: 40% de acetonitrila e 60% de água acidificada (H₃PO₄ 0,1% v/v) de 0 a 8 min; 100% de acetonitrila de 8 a 17 min e 40% de acetonitrila e 60% de água acidificada (H₃PO₄ 0,1% v/v) de 17 a 25 min. O fluxo foi de 1 mL min⁻¹ e o volume de injeção de 20 µL. A temperatura do forno da coluna foi de 40°C e o comprimento de onda de leitura das amostras foi de 221 nm para ametrina, 246 nm para hexazinona e 250 nm para diurom. O tempo de análise foi de 25 minutos e os tempos de retenção do ametrina, hexazinona e diurom, nessas condições, foram de 5,24, 6,80 e 13,36 minutos, respectivamente. O limite de quantificação para os três herbicidas foi de 0,016 µg g⁻¹. As recuperações médias dos três herbicidas foram de 93,6; 87,8 e 91,0% para a ametrina, hexazinona e diurom, respectivamente.

Os dados de degradação foram ajustados ao modelo de cinética de primeira ordem e ao modelo de cinética de primeira ordem multicompartimental (GUSTAFSON & HOLDEN, 1990), utilizando o programa SigmaPlot® versão 12.5 pelo método do ajuste de regressão não linear. O modelo de cinética de primeira ordem é dado por:

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

onde:

C = quantidade do agrotóxico no solo no tempo t (%)

C₀ = quantidade do agrotóxico aplicado ao solo no tempo 0 (%)

k = taxa de degradação (dia⁻¹)

t = tempo (dias)

O modelo de cinética de primeira ordem multicompartimental (GUSTAFSON e HOLDEN, 1990) é dado por:

$$C = C_0 \cdot (1 + \beta \cdot t)^{-\alpha} \quad (2)$$

em que:

α = parâmetro adimensional

β = parâmetro (dia⁻¹)

A qualidade do ajuste dos dados observados aos dois modelos testados foi feita com base na análise visual, no coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros dos modelos pelo teste t a 5% e na análise dos resíduos padronizados (NETER et al., 1996).

Os tempos de meia-vida (TD_{50}) da ametrina, hexazinona e diurom foram estimados para os modelos de cinética de primeira ordem e de cinética de primeira ordem multicompartmental, respectivamente, por:

$$TD_{50} = \frac{0,693}{k} \quad (3)$$

$$TD_{50} = \frac{1}{\beta} \left(2^{\left(\frac{1}{\alpha}\right)} - 1 \right) \quad (4)$$

Resultados e Discussão

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) do ajuste dos dados de degradação variaram de 0,53 a 0,93 para o modelo de cinética de primeira ordem (CPO) e de 0,79 a 0,95 para o modelo de cinética de primeira ordem multicompartmental (CPOM) (Tabelas 2 e 3). Para todos os herbicidas e temperaturas avaliadas, os valores de R^2 do modelo CPOM foram superiores ao CPO, indicando assim a superioridade do modelo CPOM em descrever a cinética de degradação dos herbicidas.

Tabela 2. Parâmetros (\pm erro padrão) do modelo de cinética de primeira ordem (CPO) para os herbicidas ametrina, hexazinona e diurom em diferentes temperaturas.

Herbicidas	T (°C)	CPO		TD ₅₀ (dia)	R ²
		M ₀ (%)	K (dia ⁻¹)		
Ametrina	25	88,09±4,69*	0,029±0,004*	24	0,84
	35	75,75±4,91*	0,015±0,004*	46	0,58
	40	82,49±4,29*	0,021±0,003*	33	0,78
	45	82,22±3,98*	0,009±0,002*	NE	0,53
Hexazinona	25	95,33±2,52*	0,009±0,001*	NE	0,79
	35	80,92±4,07*	0,012±0,003*	58	0,63
	40	91,32±2,41*	0,019±0,002*	36	0,93
	45	91,18±3,43*	0,023±0,003*	30	0,89
Diurom	25	94,56±1,80*	0,007±0,0009*	NE	0,83
	35	85,06±3,52*	0,017±0,002*	41	0,80
	40	82,23±3,82*	0,018±0,003*	39	0,79
	45	78,91±5,48*	0,022±0,005*	32	0,67

* Significativo pelo teste t a 5%.

Tabela 3. Parâmetros (\pm erro padrão) do modelo de cinética de primeira ordem multicompartimental (CPOM) para os herbicidas ametrina, hexazinona e diurom em diferentes temperaturas.

Herbicidas	T (°C)	CPOM			TD ₅₀ (dia)	R ²
		M ₀ (%)	α (-)	β (dia)		
Ametrina	25	100,76 \pm 4,82*	0,57 \pm 0,16*	0,16 \pm 0,09 ^{ns}	15	0,92
	35	99,95 \pm 2,78*	0,16 \pm 0,02*	4,06 \pm 2,53 ^{ns}	19	0,95
	40	99,73 \pm 3,95*	0,31 \pm 0,06*	0,48 \pm 0,24 ^{ns}	17	0,93
	45	100,13 \pm 3,64*	0,12 \pm 0,02*	2,24 \pm 1,93 ^{ns}	-	0,88
Hexazinona	25	99,05 \pm 3,96*	0,31 \pm 0,21 ^{ns}	0,06 \pm 0,07 ^{ns}	-	0,79
	35	99,93 \pm 3,57*	0,15 \pm 0,03*	1,90 \pm 1,37 ^{ns}	50	0,91
	40	94,64 \pm 3,29*	1,12 \pm 0,71 ^{ns}	0,03 \pm 0,02 ^{ns}	33	0,93
	45	98,93 \pm 4,28*	0,67 \pm 0,24*	0,08 \pm 0,05 ^{ns}	23	0,92
Diurom	25	100,46 \pm 1,95*	0,17 \pm 0,04*	0,16 \pm 0,09 ^{ns}	-	0,93
	35	99,47 \pm 3,33*	0,27 \pm 0,05*	0,39 \pm 0,19 ^{ns}	29	0,94
	40	99,20 \pm 3,79*	0,26 \pm 0,05*	0,62 \pm 0,33 ^{ns}	22	0,93
	45	99,90 \pm 4,65*	0,28 \pm 0,06*	0,86 \pm 0,54 ^{ns}	13	0,91

* Significativo pelo teste t a 5% ^{ns} Não significativo pelo teste t a 5%.

Esta superioridade do modelo CPOM também é observada nas Figuras 1, 2 e 3, por meio de análise visual. Para ambos os modelos, considerando todos os herbicidas e temperaturas, mais de 90% dos resíduos padronizados ficaram entre 2 e -2. O modelo de CPOM descreve uma degradação bifásica, que se caracteriza por uma degradação inicial rápida do agrotóxico no solo, seguida por uma mais lenta (FOCUS, 2006). Pesquisas envolvendo a degradação de herbicidas em solos têm mostrado a necessidade de modelos bifásicos para descrever a cinética de degradação e o efeito da temperatura na taxa de degradação de agrotóxicos (BRUM et al., 2013; MARCHESAN, 2016). Diversos são os fatores que podem levar à degradação bifásica de herbicidas em solos como, por exemplo: a) decréscimo da concentração do herbicida na fase líquida do solo ao longo do tempo devido aos processos de sorção e difusão em condições de não equilíbrio (PIGNATELLO, 2000); b) diminuição da atividade microbiana nas amostras de solos incubadas durante os estudos de degradação, em função da diminuição de fontes de carbono e outros nutrientes (ANDERSON, 1987); c) variabilidade espacial em nível microscópico das taxas de degradação (GUSTAFSON & HOLDEN, 1990).

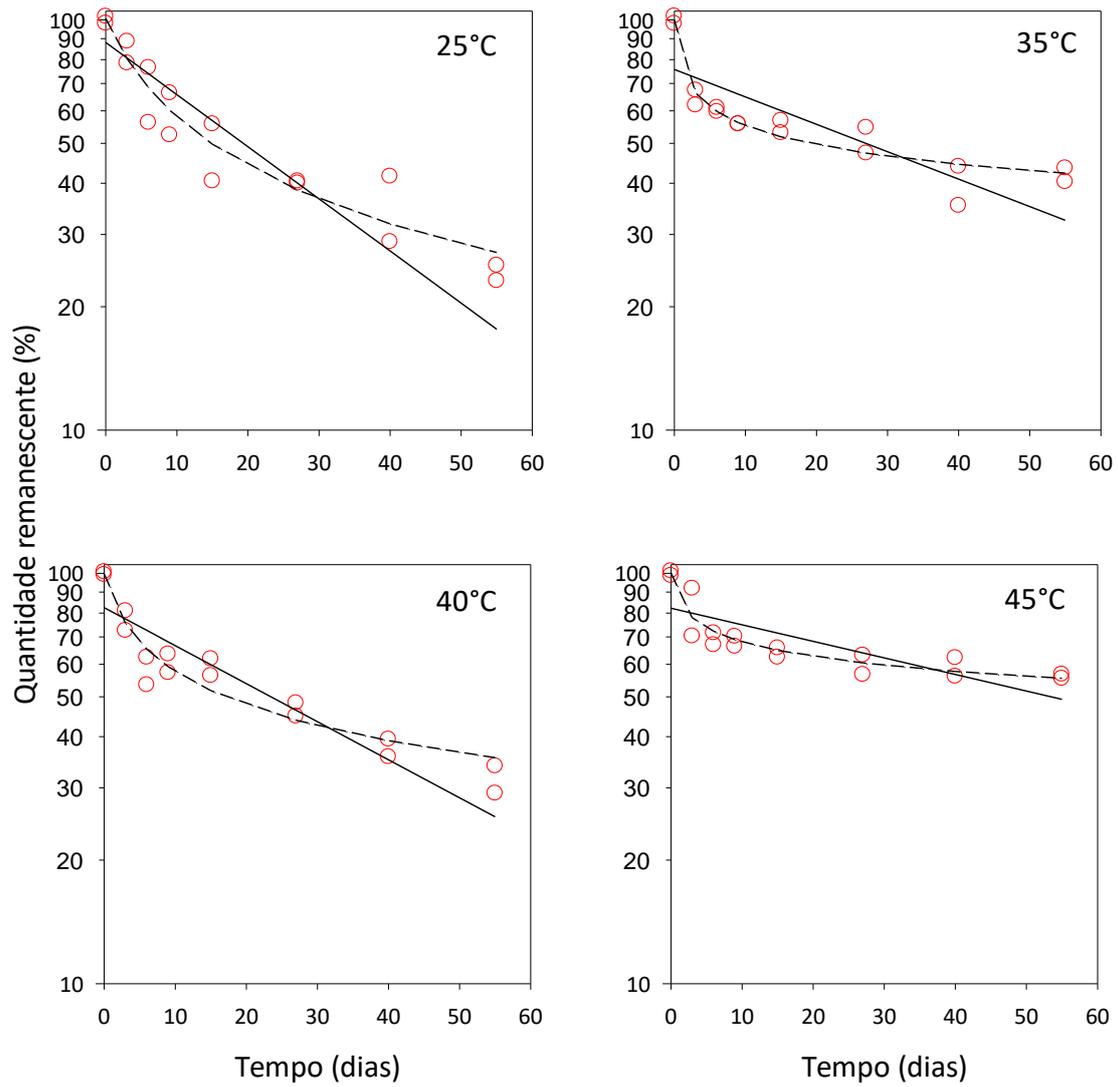


Figura 1. Degradação de ametryn em um Latossolo Vermelho Distroférico típico em Dourados, MS, incubado a 25, 35, 40 e 45°C.

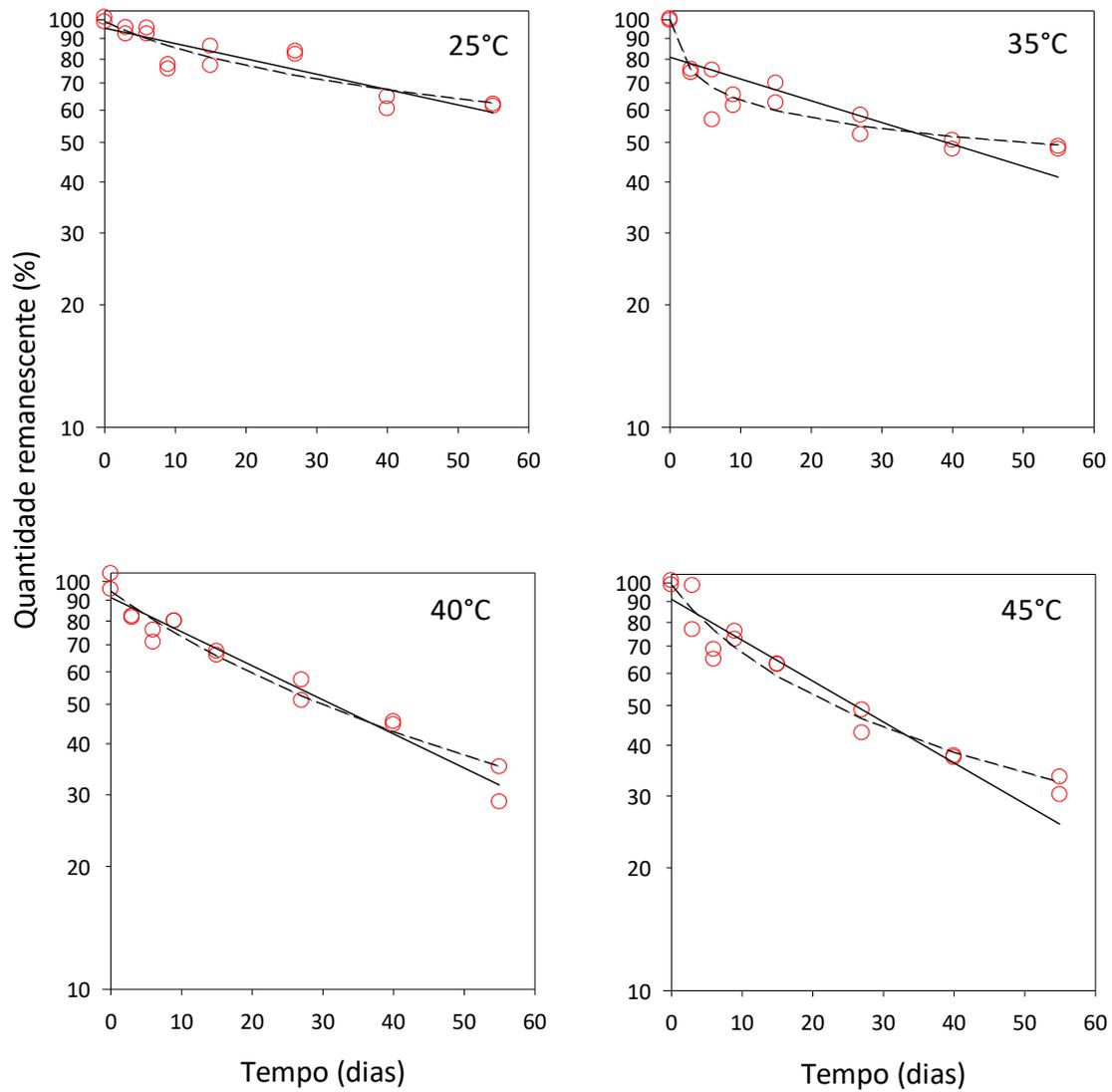


Figura 2. Degradação de hexazinona em um Latossolo Vermelho Distroférico típico em Dourados, MS, incubado a 25, 35, 40 e 45°C.

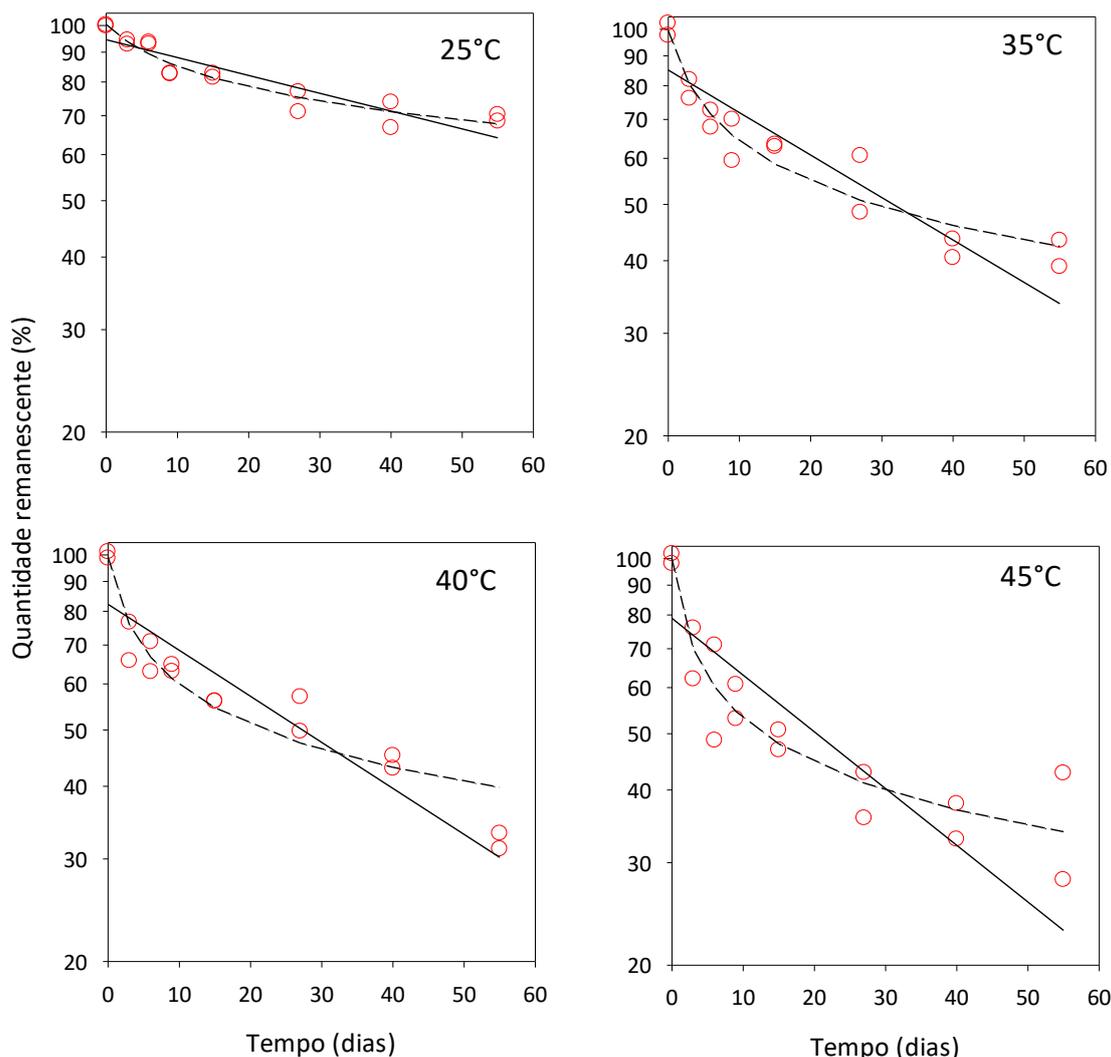


Figura 3. Degradação do diurom em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em Dourados, MS, incubado a 25, 35, 40 e 45°C.

As estimativas dos valores de meia-vida (TD_{50}) (Tabelas 2 e 3) do herbicida ametrina, nas quatro temperaturas, variaram de 24 a 46 dias com base no modelo de CPO e de 15 a 19 dias para o modelo de CPOM. Já para a hexazinona, os valores de TD_{50} nas quatro temperaturas variaram de 30 a 58 dias com base no modelo de CPO e de 23 a 50 dias para o modelo de CPOM.

Para o diurom, os valores de TD_{50} nas quatro temperaturas variaram de 32 a 41 dias com base no modelo de CPO e de 13 a 29 dias para o modelo de CPOM (Tabelas 2 e 3). Diante da superioridade do modelo de CPOM em descrever a cinética de degradação de todos os herbicidas nas diferentes temperaturas, gerando estimativas de TD_{50} mais precisas, decidiu-se por considerar na comparação da persistência dos herbicidas, nas condições estudadas, apenas os valores de TD_{50} obtidos pelo modelo de CPOM. Para a temperatura de 25°C não foi possível estimar os valores de TD_{50} para os herbicidas hexazinona e diurom, já que as quantidades remanescentes desse herbicida não atingiram 50% da dose aplicada durante a duração do experimento de 55 dias. FOCUS (2006) recomenda que se evite a estimativa de valores TD_{50} quando há necessidade de extrapolação de valores para além do período experimental, podendo gerar estimativas não confiáveis. A ametrina mostrou-se o herbicida menos persistente nas temperaturas de 35 e 40°C, seguido pelo diurom e hexazinona (Tabela 3). Para a

temperatura de 45°C, o diurom mostrou-se menos persistente que a hexazinona, com valores de TD₅₀ iguais a 13 e 23 dias, respectivamente.

De maneira geral, observa-se que o aumento da temperatura diminuiu a persistência da hexazinona e do diurom (Tabela 3). Não foi observada tendência clara do efeito da temperatura na degradação da ametrina, sendo sua principal via de degradação realizada por microrganismos (PEREIRA, 2012). Nas regiões tropicais a degradação mais rápida dos agrotóxicos pode ser explicada pelo fato que em maiores temperaturas tem-se um aumento na atividade microbiana e, por consequência, uma maior degradação por via biológica (BRUM et al., 2013). Além dos microrganismos, a temperatura tem importante efeito termodinâmico que influencia diretamente no metabolismo celular e na maioria das propriedades físicas e químicas do microambiente (MARTINEZ et al., 2008), interagindo com as condições do local (sistema de manejo das culturas, conteúdo orgânico, pH, fertilidade do solo e porosidade) na degradação e persistência dos agrotóxicos no solo (AL-MAMUN, 2017).

Em vários outros estudos com degradação de agrotóxicos, foi possível observar que em condição de maior temperatura a degradação dos agrotóxicos é mais rápida (SILVA et al., 2010; MARTINEZ et al., 2010; BRUM et al., 2013). ALVES (2012) avaliando a degradação da ametrina em solos de Piracicaba-SP, observou valores de TD₅₀ de 20 dias a 20°C em um Argissolo Vermelho, sendo semelhante ao observado neste estudo (15 e 19 dias). ANDRADE et al. (2010) observaram valores de TD₅₀ para ametrina com solos na região de Viçosa-MG, iguais a 11 dias em Argissolo Vermelho-Amarelo e de 12 a 26 dias em Latossolo Vermelho-Amarelo. Em outro trabalho, a TD₅₀ de ametrina foi medida em cinco diferentes tipos de solo em Mossoró-RN e apresentou meia-vida de 49 dias para Neossolo, 35 dias para Argissolo e 28 dias para Latossolo, Cambissolo e Espodossolo (SILVA, 2016). Esses resultados, no entanto, foram superiores quando comparados aos obtidos neste estudo (15 a 19 dias).

Para o composto hexazinona, em solos de diferentes regiões de Gurupi-TO e Viçosa-MG, observou-se valores de TD₅₀ iguais a 83 e 182 dias (SOUZA, 2016). Na região de Ribeirão Preto-SP, em um Latossolo Vermelho Distrófico psamítico, QUEIROZ et al. (2009) observaram que a TD₅₀ de hexazinona ficou entre 125 e 145 dias. No presente estudo, a hexazinona apresentou a maior persistência no solo em comparação aos compostos ametrina e diurom.

Para o composto diurom, SILVA et al. (2010) observaram valores de TD₅₀ entre 30 e 63 dias em um Latossolo Amarelo para as temperaturas de 30 e 40 °C, respectivamente. Quando comparado esses resultados com os obtidos neste estudo, o valor de TD₅₀ de 63 dias (40°C) foi superior ao encontrado no presente estudo (39 dias a 40°C). A degradação do diurom está relacionada principalmente com as características do solo. A presença de matéria orgânica aumenta a retenção desse produto na matriz do solo devido sua alta capacidade de sorção e, conseqüentemente, diminui sua degradação pela atividade de microrganismos. Possivelmente, o maior valor de TD₅₀ para o diurom no trabalho de SILVA et al. (2010) quando comparado a esse estudo, se deve ao maior teor de carbono orgânico no solo utilizado no estudo de SILVA et al. (2010), levando a uma maior sorção e diminuição da degradação.

De maneira geral, a degradação dos herbicidas no solo apresentou variação conforme a molécula, sendo essa degradação dependente da temperatura do ambiente, caracterizando uma degradação mais rápida em maiores temperaturas, com valores de meia vida variando entre 15 e 19 dias para ametrina, entre 23 e 50 dias para hexazinona e entre 13 e 29 dias para diurom.

Conclusões

1. As moléculas hexazinona e diurom foram degradadas mais rapidamente em condições de temperaturas mais elevadas;
2. Não foi observado efeito do aumento da temperatura na diminuição da persistência da ametrina;
3. Os valores de TD₅₀ para os três herbicidas avaliados, nas temperaturas de 25, 35, 40 e 45°C ficaram entre 15 e 19 dias para a ametrina, entre 23 e 50 dias para a hexazinona e entre 13 e 29 dias para o diurom;

Agradecimentos

À CAPES, pela bolsa de mestrado do primeiro autor.

Referências bibliográficas

- AL-MAMUN, A. Pesticide degradations, residues and environmental concerns. In: KHAN, M.S; RAHMAN, M.S. **Pesticide residue in foods: sources, management, and control**. Springer International Publishing, Dhaka: 2017. 1-17p.
- ALVES, P.A.T. **Comportamento dos herbicidas ametrina e glifosato aplicados em associação em solo de cultivo de cana-de-açúcar**. 2012. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- ANDERSON, J.P.E. Handling and storage of soils for pesticide experiments. In: SOMERVILLE, L.; GREAVES, M. P. (Ed.). **Pesticide effects on soil microflora**. London: Taylor & Francis, p.45-60, 1987.
- ANDRADE, S.R.B.; SILVA, A.A.; LIMA, C.F.; QUEIROZ, M.E.L.R.; FRANÇA, A, A.C.; D'ANTONINO, L. Meia-vida do ametryn em Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, com diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, v.28, n.2, p.375-383, 2010.
- BRUM, C.S.; FRANCO, A.A.; SCORZA JÚNIOR, R.P. Degradação do herbicida sulfentrazone em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.5, p.558-564, 2013.
- BURROWS, H.D.; CANLE, L.M.; SANTABALLA, J.A.; STEENKEN, S. Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v.67, n.2, p.71-108, 2002.
- CALDERON, M.J.; LUNA, E.; GOMEZ, J.A.; HERMOSIN, M.C. Herbicide monitoring in soil, runoff waters and sediments in an olive orchard. **Science of the Total Environment**, v.569-570, p.416-422, 2016.
- FENNER, K.; CANONICA, S.; WACKETT, L.P.; ELSNER, M. Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. **Science**, v.341, n.6147, p.752-758, 2013.
- FOCUS, E.U. Guidance document on estimating persistence and degradation kinetics from environmental fate Studies on pesticides in EU registration. In: the final report of the Work Group on Degradation Kinetics of FOCUS: Sanco/10058/2005, version 2.0. Brussels: 434p, 2006.
- GAVRILESCU, M. Review – fate of pesticides in the environment and its bioremediation. *Engineering in Life Sciences*, v.5, n.6, p.497-526, 2005.

GUSTAFSON, D.; HOLDEN, L.R. Nonlinear pesticide dissipation in soil: a new model based on spatial variability. **Environmental Science and Technology**, v.24, n.7, p.1032-1038, 1990.

KIM, K.; KABIR, E.; JAHAN, S.A. Exposure to pesticides and the associated human health effects. **Science of the Total Environment**, v.575, p.525–535, 2017.

LEWIS, K.A.; TZILIVAKIS, J.; WARNER, D.; GREEN, A. An international database for pesticide risk assessments and management. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.22, n.4, p.105 -1064, 2016.

LOPES, C.V.A.; ALBUQUERQUE, G.S.C. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde Debate**, v.42, n.117, p.518-534, 2018.

LORENZI, H. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional**. 7ª Ed. Nova Odessa: Plantarum, 2014. 379p.

MARCHESAN, E.D. **Destino no ambiente e comportamento agronômico de atrazina em resposta a doses e níveis de palha de espécies de cobertura de solo**. 2016. 110f. Tese (Doutorado em Agronomia, Sistemas de Produção Vegetal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

MARTINEZ, C.O.; SILVA, C.M.M.S.; FAY, E.F.; ABAKERLI, R.B.; MAIA, A.H.N.; DURRANT, L.R. The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. **Geoderma**, v.147, n.1, p.56-62, 2008.

MARTINEZ, C.O.; SILVA, C.M.M.S.; FAY, E.F.; ABAKERLI, R.B.; MAIA, A.H.N.; DURRANT, L.R. Microbial degradation of sulfentrazone in a Brazilian rhodic hapludox soil. **Brazilian Journal of Microbiology**, v.41, n.1, p.209-217, 2010.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4ª Ed. Chicago: Irwin, 1996. 1408p.

PEREIRA, L. **Efeitos dos herbicidas clomazone e ametrina em parâmetros funcionais da espécie de peixe neotropical Prochilodus lineatus**. 2012. 100f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

PIGNATELLO, J.J. The measurement and interpretation of sorption and sorption rates of organic compounds in soil media. **Advances in Agronomy**, v.69, p.1-73, 2000.

PORTUGAL, E.J.; BURTH, P.; FORTUNA, J.L. Análise da contaminação por agrotóxicos em fontes de água de comunidades agrícolas no Extremo Sul da Bahia. **Revinter**, v.10, n.2, p.85-102, 2017.

PORTILHO, I.I.R.; SCORZA JÚNIOR, R.P.; SALTON, J.C.; MENDES, I.C.; MERCANTE, F.M. Persistência de inseticidas e parâmetros microbiológicos em solo sob sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.45, n.1, p.22-28, 2015.

QUEIROZ, S.C.N.; FERRACINI, V.L.; GOMES, M.A.F.; ROSA, M.A. Comportamento do herbicida hexazinone em área de recarga do aquífero Guarani cultivada com cana-de-açúcar. **Química Nova**, v.32, n.2, p.378-381, 2009.

ROCHA, P.R.R.; FARIA, A. T.; SILVA, G.S.; QUEIROZ, M.E.L.R.; GUIMARÃES, F.C.N.; TIRONI, S.P.; GALON, L.; SILVA, A.A. Meia-vida do diuron em solos com diferentes atributos físicos e químicos. **Ciência Rural**, v.43, n.11, p.1961-1966, 2013.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, V.B.; COELHO, M.R.; LUMBREAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Solos, 2006. 306p.

SCORZA JÚNIOR, R.P.; FRANCO, A.A. A temperatura e umidade na degradação de fipronil em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Ciência Rural**, v.43, n.7, p.1203-1209, 2013.

SINGH, S.N. **Microbe-Induced Degradation of Pesticides**. Ed. Cham: Springer, 2017. 233p.

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

SILVA, K.S. **Lixiviação e persistência de ametryn em solos da região canavieira do nordeste brasileiro**. 2016. 71f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

SOUZA, G.V. **Comportamento no solo dos herbicidas diuron e hexazinone aplicados isolados e em misturas**. 2016. 680f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

ZENG, T.; CHIN, Y. P.; ARNOLD, W. A. Potential for abiotic reduction of pesticides in prairie pothole porewaters. **Environmental Science & Technology**, v.46, n.6, p.3177–3187, 2012.

Recebido em 26/02/2019

Aceito em 18/03/2019