

REVISÃO: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO GLIFOSATO NO ECOSSISTEMA AGRÍCOLA E SUA TOXICIDADE PARA A SAÚDE HUMANA

Peterson Haas¹, Lucélia Hoehne², Daniel Kuhn³

Resumo: As ervas consideradas invasoras acarretam em 34% a redução da produtividade rural, por meio da competição por recursos presentes no solo, espaço físico e, inclusive, luminosidade. Portanto, a utilização de técnicas com o intuito de realizar o controle agrícola se torna necessária, seja por meio de práticas manuais e mecânicas ou através da aplicação de herbicidas, em que cerca de 60% do comércio mundial desses são à base de glifosato. No entanto, existem efeitos colaterais devido ao uso desses produtos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão sobre os efeitos do glifosato em relação ao ecossistema e à fisiologia vegetal, além de expor seus malefícios à saúde humana. Como resultados, verificou-se que o princípio-ativo é um agente não seletivo, pós-emergente e sistêmico e sua eficiência é atribuída devido ao seu mecanismo de ação que inibe a enzima 5-enolpiruvilshikimate-3-fosfato sintase, uma molécula essencial para a síntese de metabólitos secundários na via do ácido chiquímico. Embora seres-humanos e demais animais, em geral, não produzem os metabólitos secundários da via do ácido chiquímico, não se atribui toxicidade aguda ao glifosato. Contudo, verifica-se que, em virtude do aumento da resistência de ervas ao agente, eleva-se a dosagem de aplicação, propiciando biocumulação no solo e na própria cultura vegetal que o ser humano ingere posteriormente, absorvendo o contaminante. Portanto, observa-se que a atual legislação brasileira deve intervir através de trâmites que determinem doses máximas do glifosato em lavouras, estando em consonância com os limites de ingestão diária do composto de modo a reduzir os efeitos do glifosato na saúde humana e no ecossistema.

Palavras-chave: Glifosato, Controle Agrícola, Resistência de Ervas, Toxicidade.

1 Bolsista de Iniciação Científica Júnior, na Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado/RS, peterson.haas@gmail.com.

2 Professora e Doutora em Química, na Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado/RS, luceliah@univates.br.

3 Mestrado em Biotecnologia, na Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado/RS, danielkuhn@universo.univates.br.

INTRODUÇÃO

A ocupação de ervas na agricultura influencia o crescimento e o desenvolvimento das raízes do cultivo, uma vez que ocorre a competição por espaço, luz, água e nutrientes do solo, o que acarreta em baixo rendimento agrícola (WILSON, 1988; CLEMENTS, WEAVER, HANSON, 1929; RIZZARDI, 2001). Estima-se que práticas manuais e mecânicas de remoção das mesmas e a aplicação de herbicidas têm sido os métodos mais eficazes de controle de ervas (GRIEPENTROG e DEDOUSIS, 2010; ZIMDAHL, 2007). Dessa forma, a utilização destes compostos foi fundamental para a criação do sistema de plantio direto (SPD), implicando na eficácia da produção, visto que inibem o desenvolvimento de ervas específicas (seletivo) ou em geral (não-seletivo).

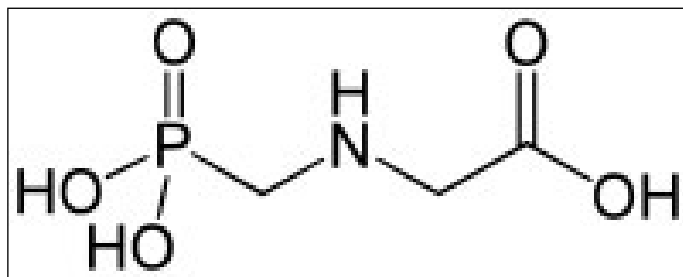
As classificações para esses agroquímicos são variadas, devido aos diferentes mecanismos de ação, grupos químicos, formulação, resistência do vegetal, seletividade e índices toxicológicos. Contudo, verifica-se que os inibidores mais comercializados mundialmente são à base de glifosato [N-(fosfometil)glicina], um princípio-ativo não-seletivo, pós-emergente e sistêmico (JUNIOR & SANTOS, 2002). Embora o mecanismo de ação do composto não atinja diretamente o organismo humano - tal fator que ocasiona baixa toxicidade ao mesmo -, há evidências de efeitos ambientais, o que implica em contaminação do solo e de lençóis freáticos e elevada dosagem do princípio-ativo nas produções agrícolas a partir do aumento da resistência de determinadas culturas. Posteriormente, o glifosato pode ser ingerido após ser absorvido pela cultura, acumulando-se e ultrapassando o grau de toxicidade permitido pela legislação (JUNIOR & SANTOS, 2002)

Portanto, o objetivo deste artigo de revisão é avaliar os efeitos do glifosato em relação ao ecossistema e à fisiologia vegetal, além de expor seus malefícios à saúde humana.

MECANISMO DE AÇÃO DO GLIFOSATO NAS PLANTAS

O glifosato (Figura 1) é pulverizado nos ambientes agrícolas e absorvido pela planta através das folhas, translocando-se pelo floema para todas as suas partes até se depositar nas regiões meristemáticas responsáveis pelo crescimento vegetal (JUNIOR & SANTOS, 2002). O herbicida age, então, nos vários sistemas enzimáticos, inibindo, especificamente, a enzima 5-enolpiruvilshikimate-3-fosfato sintase (EPSPs), que atua fundamentalmente na via do ácido chiquímico. Visto que esse é precursor de importantes metabólitos secundários da planta, através da inibição dessa enzima o glifosato interrompe a produção desses compostos, acarretando em um desequilíbrio metabólico (YAMADA & CASTRO, 2007).

Figura 1. Fórmula Estrutural do Glifosato



Dada a não-seletividade do agente, as enzimas EPSPs de plantas, fungos e da maioria de bactérias isoladas e caracterizadas são inibidas pelo mesmo, portanto, utilizam-se técnicas que impedem a ação contra culturas agrícolas, como a soja e o milho, por exemplo (NETTO, 2017). Dessa forma, cultivos transgênicos são empregados, os quais garantem resistência ao composto através de técnicas de DNA recombinante (SIQUEIRA *et al.*, 2004). Assim, bactérias que superproduzem essa enzima possuem um código genético que permite a elas se desenvolverem sob altas concentrações do glifosato, portanto a transferência de genes de determinadas microorganismos à cultura vegetal confere tolerância a mesma diante da aplicação do herbicida (YAMADA & CASTRO, 2007).

EFEITOS DO GLIFOSATO AO ECOSSISTEMA AGRÍCOLA E À FISIOLOGIA VEGETAL

Uma vez aplicado sobre o solo, as moléculas do herbicida podem ser degradadas ou adsorvidas. Tanto um processo quanto o outro pode acarretar na absorção do composto pelas plantas ou à lixiviação até lençóis freáticos e camadas sub-superficiais como um todo, ainda que a contaminação de águas subterrâneas seja pouco provável devido à rápida adsorção do poluente no solo (JUNIOR & SANTOS, 2002). Em vista disso, dada a não seletividade do glifosato, este retorna ao solo após a absorção pelo vegetal, visto que, na maioria das vezes, não é metabolizado pela planta (TONI, SANTANA, ZAIA, 2006). Dessa forma, possibilita-se um aumento na disponibilidade biológica do composto no ambiente.

Portanto, a adsorção do glifosato em solos e minerais é fundamental para diminuir sua concentração, acelerar a degradação química do composto e retardar o movimento de lixiviação (TONI, SANTANA, ZAIA, 2006). Porém, diversos fatores interferem na eficiência do processo e na persistência do herbicida no solo, como temperatura, pH, umidade, matéria orgânica, minerais e óxidos, etc. Além disso, os mecanismos principais para o processo são através da troca de ligantes com óxidos de ferro e alumínio e as pontes de hidrogênio formadas entre o composto e as substâncias ricas presentes no solo (FENG e

THOMPSON, 1990). Portanto, observa-se uma variação no tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) do glifosato, dependendo das taxas de matéria orgânica e argila, nível de atividade microbiana e histórico de aplicações do composto (MORAES & ROSSI, 2010; ARAÚJO *et al*, 2003). Logo, estudos apontaram $t_{1/2}$ igual a 19,2 dias para solos arenosos (CHEAH, KIRKWOOD, LUM, 1997), $t_{1/2}$ igual a 8 a 9 dias para argissolos vermelho-amarelo (ARAÚJO *et al*, 2003) e $t_{1/2}$ igual a 12 dias para latossolos argilosos (ARAÚJO *et al*, 2003), .

Em vista disso, valores acentuados de meia-vida do herbicida no ambiente promovem um período maior de exposição com a biodiversidade presente em solos agrícolas (TONI, SANTANA, ZAIA, 2006). Uma das interferências é atribuída à transferência do composto por meio da planta-alvo para o cultivo. Essa passagem ocorre por meio do contato entre as raízes, influenciando na absorção do composto pela cultura e, conseqüentemente, na redução do sistema radicular. Segundo SANTOS *et al*. (2007), identificou-se que a época de aplicação do herbicida é um fator que pode acarretar efeitos adversos ao cultivo. Portanto, em intervalos de menos de 7 dias antes da semeadura, as concentrações de glifosato no solo ainda são altas, prejudicando o desenvolvimento radicular e inibindo a formação de uma densa microbiota nas raízes do vegetal. Dessa forma, verifica-se que a dessecação antecipada, ou seja, o controle químico realizado de 2 a 3 semanas antes da semeadura, proporciona melhores rendimentos.

Apesar do uso de herbicidas ser potente no combate às ervas, seu uso contribui para a susceptibilidade do cultivo diante de doenças vegetais (DUKE *et al*. 2006). Embora ainda hajam estudos insuficientes que abordem o processo físico-químico do glifosato responsável por aumentar a sensibilidade do vegetal, há significativas relações entre a atividade fungicida dos mesmos. Uma vez que diminui a microbiota e sistema radicular, a planta adquire baixa absorção de nutrientes (DALLMANN *et al*, 2010). Conseqüentemente, evidenciou-se que doses elevadas do agente reduzem o nível de fitoalexinas, um composto vegetal com propriedade antibacteriana, o que predispõe o vegetal a doenças. O aumento da susceptibilidade é predominantemente observado em culturas não-transgênicas, visto que a síntese de fitoalexinas é afetada em vegetais que possuem a via do ácido chiquímico interrompida.

Entretanto, a deposição de resíduos tóxicos no solo pode possibilitar a migração para águas superficiais por meio de lixiviação ou ação do vento. Em água, o tempo de meia-vida é mais curto em relação à persistência do composto no solo, visto que seus componentes são solúveis e podem se dispersar rapidamente (MORAES & ROSSI, 2010). Sob águas superficiais, a degradação por microorganismos e adsorção por sedimentos corroboram para que o herbicida se dissipa de modo acelerado. A exemplo, estudos abordaram $t_{1/2}$ de 7 a 21 dias (PATTERSON, 2007) e 7 a 14 dias (GIESY, DOBSON, SOLOMON, 2000).

Dessa forma, a contaminação de rios e lagos afeta diretamente o ecossistema aquático do meio, acarretando mortalidade de peixes e aves que se alimentam na fauna aquática (SANCHES, 2003). Além disso, ocorre a poluição do meio, dificultando ou impedindo a atuação de processos de purificação de água para consumo humano, dada a dificuldade de separação do composto (JUNIOR & SANTOS, 2002). Por tais circunstâncias, o glifosato e demais agroquímicos são considerados micropoluentes, devido ao seu caráter toxicológico no ecossistema (TONI, SANTANA, ZAIA, 2006).

Além da via de contaminação por contato direto, a dispersão aérea do composto implica em uma área de atuação maior. Dessa forma, a pulverização do composto pode ocasionar difusão para solos e recursos hídricos não-alvos. Ademais, o mesmo pode se disseminar para localidades domésticas quando estas se encontram próximas do espaço agrícola produtivo, vulnerabilizando o trabalhador por meio das vias de exposição dérmica e respiratória, além de contaminá-lo através do consumo de água quando este recurso provém de fontes hídricas dentro da área de abrangência do composto. Em adição, verifica-se que o glifosato pode promover ação sinérgica quando interagido com outras substâncias presentes no meio, acentuando seu potencial toxicológico para o ambiente e saúde humana (AMARAL, ROSA, SARCINELLI, 2013).

RESISTÊNCIA DE ERVAS A HERBICIDAS

A resistência de ervas por inibidores da enzima EPSPs deve-se a mutações do gene de plantas e bactérias que codifica a enzima EPSPs do sítio-ativo. Além disso, a seletividade natural de sementes geneticamente resistentes corrobora com a formação de linhagens pouco susceptíveis a ação do glifosato, beneficiando genótipos resistentes a se perpetuarem por gerações (VAN BRUGGEN, 2018). Tal circunstância deve-se a ação prolongada e de doses acentuadas do composto, acarretando efeitos deletérios no ambiente e à saúde do ser humano (JUNIOR & SANTOS, 2002).

O aumento da resistência de ervas a inibidores de EPSPs é um fator que compromete o controle agrícola, uma vez que aumenta-se a dosagem de herbicidas e, conseqüentemente, os custos de produção e susceptibilidade do cultivo, possibilitando redução na produtividade agrícola (IKEDA, 2013). Dessa forma, verifica-se a importância de métodos alternativos de controle, tal como herbicidas com mecanismos de ação diferentes, rotação de culturas e/ou uso de pré-emergentes, os quais atuam diretamente na germinação de sementes de ervas (NETTO, 2017).

EFEITOS TÓXICOS DO GLIFOSATO À SAÚDE HUMANA

Visto que animais não possuem a via do ácido chiquímico, observa-se a índices baixos ou ausentes de efeitos agudos causados pelo glifosato, pois não acarreta desequilíbrio metabólico pela interrupção da atividade enzimática

(JUNIOR & SANTOS, 2002). Todavia, a presença de adjuvantes e conservantes na formulação dos herbicidas - os quais melhoram o desempenho do agente aumentando sua penetração no vegetal, emulsificação de compostos e dispersão no ambiente - torna tóxica a atividade sinérgica dessas propriedades (VAN BRUGGEN, 2018).

Além disso, verifica-se que, embora no Brasil não haja a existência de trâmites legais que estabelecem o limite do glifosato e qualquer herbicida em águas ou solo, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) estabelece um limite de 700 µg/L de glifosato em água potável e dose diária aceitável do composto por massa corpórea equivale a 0,05 mg/kg (BARCELÓ, 1993). Contudo, a dose estipulada do composto é muitas vezes ultrapassada, evidenciando alta exposição do herbicida no ambiente. Dessa forma, evidencia-se que os efeitos crônicos dos herbicidas à base de glifosato estão relacionados com a elevada dosagem ingerida dos mesmos e acumuladas pelo organismo (VAN BRUGGEN, 2018).

Revela-se, portanto, irritação dérmica e ocular, com aumento de susceptibilidade de danos hepáticos e renais, doenças respiratórias e dermatológicas associadas à dispersão aérea do composto e à desregulação endócrina e do ciclo celular (OPAS, 1996; JUNIOR & SANTOS, 2002). Todavia estudos já indicaram malefícios gastrointestinais em testes com ratos e porcos devido a contaminação dos alimentos e efeitos psicológicos devido à exposição contínua. Contudo, mais experimentações práticas se fazem necessárias para a comprovação efetiva desses resultados, visto que estudos ainda não demonstraram efeitos ao sangue, pâncreas e evidência de carcinogenicidade nos seres humanos (CARNEIRO, 2012).

De acordo com Fluegge (2016), há estreitas relações entre a intensificação do uso de glifosato com o surgimento e agravamento do Transtorno do Déficit de Atenção com Hiperatividade em municípios próximos à regiões agrícolas. Dada a propriedade de quelante mineral, o glifosato reduz a absorção do Manganês pelo vegetal, o qual proporciona a assimilação do Nitrogênio nas plantas. Dessa forma, diminui-se a nitrificação e aumenta-se a liberação de N₂O, tal emissão que é, posteriormente, inalada por indivíduos e afeta o quadro de doenças psicológicas

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dada a crescente necessidade de rendimento agrícola, tornam-se necessárias práticas de controle de ervas e pestes. Entretanto, o uso intenso de agroquímicos favorecidos pela baixa regulamentação e fiscalização legal impõem efeitos cumulativos no solo, recursos hídricos e na saúde humana. Ademais, a resistência vegetal e a introdução de culturas geneticamente modificadas submetem, cada vez mais, a elevadas doses desses compostos,

acentuando o quadro de doenças crônicas proporcionadas pela inalação, contato e ingestão dos mesmos.

Verifica-se a importância de uma legislação nacional que regulamente a aplicação de herbicidas à base de glifosato conforme a taxa aceitável de ingestão diária dos mesmos, da mesma forma que o incentivo e a aplicação de técnicas alternativas se fundamentam para a eficácia da produção agrícola. Portanto, torna-se necessário reduzir a taxa de absorção do composto pelas plantas, tal processo que atenua a biocumulação do glifosato no organismo do ser humano e no ecossistema agrícola.

REFERÊNCIAS

AMARAL, E. I.; ROSA, A. C. S.; SARCINELLI, P. N. Estudo da exposição ambiental ao glifosato na área agrícola da serrinha do mendanha. **Pesticidas: r. ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 23, p. 67-74, 2013.

ARAÚJO, A. S. F., *et al.* Biodegradação de glifosato em dois solos brasileiros. **Pesticidas: R. Ecotoxicol e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 13, p. 157-164, 2003.

BARCELÓ, D. Environmental Protection Agency and other methods for the determination of priority pesticides and their transformation products in water. **Journal of Chromatography**, 643 (1993) 117-143.

CHEAH, U. B.; KIRKWOOD, R. C.; LUM, K. Y. Degradation of four commonly used pesticides in Malaysian agricultural soils. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Washington, v. 46, p. 1217-1223, 1998.

CLEMENTS, F. E.; WEAVER, J. E.; HANSON, H. C. (1929). *Plant Competition: An Analysis of Community Functions*. **Carnegie Institute**, Washington, D.C

DALLMANN C. M., *et al.* Impacto da aplicação de glifosato na microbiota do solo cultivado com soja geneticamente modificada. *Revista Thema*, p. 1-11, 2010.

DUKE, S. O.; CERDEIRA, A. L.; MATALLO, M. B. Uso de herbicidas e seus efeitos em doenças vegetais. **Potafos Tecnologia para agricultura: informações agronômicas**. Piracicaba, n. 115, 2006.

FENG, J. C.; THOMPSON, D. G. Fate of glyphosate in a Canadian forest watershed. 2: persistence in foliage and soils. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Washington, v. 38, p. 1118-1125, 1990.

FLUEGGE, Keith; FLUEGGE, Kyle. Glyphosate Use Predicts Healthcare Utilization for ADHD in the Healthcare Cost and Utilization Project net (HCUPnet): A Two-Way Fixed-Effects Analysis. **Pol. J. Environ. Stud.**, v. 25, n. 4, p. 1489-1503, 2016.

GIESY, J. P.; DOBSON, S.; SOLOMON, K. R. Ecotoxicological risk assessment for roundup herbicide. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v.167, n.1, p.35-120, 2000.

GRIEPENTROG, H. W.; DEDOUSIS, A. P. Mechanical Weed Control. **Soil Engineering**, Springer, p. 171-179.

IKEDA, F. S. Resistência de plantas daninhas em soja resistente ao glifosato. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 34, n. 276, p. 0-00, 2013.

JUNIOR, O. P. A.; SANTOS, T. C. R. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002.

MORAES, P. V. D., ROSSI, P. Comportamento ambiental do glifosato. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 9, n. 3, p. 22-35, 2010.

NETTO, A. G. Crescimento e desenvolvimento, resistência múltipla aos herbicidas inibidores da EPSPS-ALS e alternativas em pós-emergência para controle de **Amaranthus palmeri** (S.) Wats. Universidade de São Paulo: Piracicaba, 2017.

ORGANIZAÇÃO PANAMERICANA DE SAÚDE. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OPAS/OMS). Representação do Brasil. **Manual de vigilância da saúde de populações Expostas a agrotóxicos**, Brasília, 1996.

PATTERSON, M. Analysis of Risks to Endangered and Threatened Salmon and Steelhead. **Environmental Field Branch**, 2004.

RIZZARDI, M. A, et al. Competição por recursos do solo entre ervas daninhas e colônias. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.4, p.707-714, 2001.

SANCHES, M. S., et al. Pesticidas e seus respectivos riscos associados à contaminação da água. **Pesticidas: R. Ecotoxicol. e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 13, p. 53-58, 2003.

SANTOS, J. B. et al. Época de Dessecação Anterior à Semeadura sobre o Desenvolvimento da Soja Resistente ao Glyphosate. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n.4, p. 869-875, 2007.

SIQUEIRA, J. O. et al. Interferências no agrossistema e riscos ambientais de culturas transgênicas tolerantes a herbicidas e protegidas contra insetos. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 11-81, 2004.

TONI, L. R. M.; SANTANA, H.; ZAIA, D. A. M. Adsorção de glifosato sobre solos e minerais. **Química Nova**, Londrina, v. 29, n. 4, p. 829-833, 2006.

VAN BRUGGEN, A. H . C. et al. Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. **Science of the Total Environment**. v. 616-617, p. 255-268, 2018.

WILSON, J. B. Shoot Competition and Root Competition. **Journal of Applied Ecology**, v. 25, n. 1 , p. 279-296, 1988.

YAMADA, T.; CASTRO, P. Efeito do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. **International Plant Nutrition Institute (IPNI)**. Encarte Técnico, n. 119, 2007.

ZIMDAHL, R. L. Invasive Plants. **Fundamentals of Weed Science**. ed. 3, p. 187-221, 2007.